

고강도 강재의 강교량 적용성에 관한 연구

Feasibility Study of High Strength Steel on Steel Bridge

전 준 창¹⁾ · 김 석 태²⁾ · 경 갑 수³⁾ · 이 희 현⁴⁾

Jeon, Jun Chang · Kim, Seok Tae · Kyung, Kab Soo · Lee, Hee Hyun

요 약 : 본 연구는 중소규모의 일반 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성을 수치해석적으로 검토하기 위해 수행되었다. 강재의 항복강도, 일평균 트럭교통량 및 구조상세의 피로등급을 해석변수로 하여 AASHTO LRFD 설계기준의 한계상태를 만족하는 최소중량단면을 최적화 기법을 적용하여 산정하고 그 결과에 대해 고찰하였다. 또한, 교량의 거더 개수 및 경간길이의 변화가 고강도 강재의 적용성에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다. 검토결과, 피로의 영향을 무시할 경우 강재의 항복강도 증가와 함께 강재중량이 감소하는 경향을 나타내어 강교량에 대한 고강도 강재의 적용 가능성을 확인하였으나, 고강도 강재를 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 가장 지배적인 영향인자인 피로문제에 대한 적절한 대처가 필요함을 알 수 있었다.

ABSTRACT : Numerical analyses have been carried out in order to check the applicability of high-strength steel to a medium-sized steel bridge. Using the yield strength of steel, Average Daily Truck Traffic (ADTT), and fatigue grade of structural detail as analytical parameters, the minimum weight sections that satisfy the limit states of the AASHTO LRFD design specification were determined through an optimization scheme. Likewise, the effects of the number of girders and span length on the applicability of high-strength steel were evaluated. Results show that high-strength steel may be employed in the steel bridge, since steel weight decreases with increasing yield strength regardless of the fatigue effect. Nonetheless, appropriate countermeasures against fatigue should be determined since it is a major factor in the effective use of high-strength steel in steel bridges.

핵심용어 : 고강도 강재, AASHTO LRFD, 최소중량단면, 매개변수해석, 피로

KEYWORDS : High strength steel, AASHTO LRFD, Minimum weight section, Parametric study, Fatigue

1. 서론

국내외에서 시공되고 있거나 시공완료된 강교량의 대부분은 SM520 이하 등급의 일반 용접구조용 강재를 사용한 다수의 거더를 갖는 플레이트거더교 또는 강합성 박스 거더교 형식이다. 그러나, 최근 강재 및 교량 제작기술의 발달로 인해 현수교, 사장교와 같은 장대교량 뿐만 아니라 일반 강교량에도 경제성을 고려하여 고강도 강재의 사용이 확대될 전망이다.

강교량에서 사용강재의 고강도화에 의한 구조의 경량화, 합리화는 운송비용의 절감, 강교제작(가공, 용접기술) 및 교량시설공법 등에서의 기술개발 등을 유도하여 강교량의 경제

성과 경쟁력을 향상시킬 수 있다. 즉, 강재의 강도 향상은 설계, 제작, 가설, 운송 등의 종합적인 측면에서 강교량 합리화의 가능성을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다¹⁾.

강교량에 관한 국내의 설계기준은 재료의 허용응력에 기초한 허용응력설계법으로 규정되어 있으며, 작용하중에 의한 발생응력을 허용치 이내로 제한함으로써 안전성을 확보한다. 그러나 강교량은 구조부재의 좌굴, 반복하중에 의한 피로, 활하중에 의한 처짐 등에 대해서도 소요의 안정성 및 사용성이 확보되어야 하므로 구조부재의 단면제원 및 형상은 단지 응력만에 의해 결정되지 않는다. 따라서, 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성을 검토하기 위해서는 응력에 의한 단면검토 뿐만

1) 정희원, (주)서영기술단 부장, 공학박사

2) 정희원, 삼표산업주식회사 대리

3) 정희원, 한국해양대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

4) 정희원, (주)한국구조안전기술원 대표이사, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

아니라 최소 판두께, 판폭 두께비, 세장비, 피로 등과 같은 관련 설계기준에 의한 검토가 필요하다^{(2),(3)}.

본 연구에서는 격자구조해석에 기초한 해석결과에 최적화 기법에 의한 최소중량설계(minimum weight design) 개념을 적용하여 중소규모의 일반 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성을 검토하였다. 강교량의 안전성, 안정성 및 사용성에 대한 고강도 강재의 적용성을 검토하기 위하여 AASHTO의 LFRD 설계기준⁽⁴⁾에 규정된 한계상태를 제약조건으로서 고려하였으며, 강재의 항복강도, 일평균 트럭교통량 및 구조상세의 피로등급을 해석변수로 취하여 최소중량단면을 산정하였다. 또한, 교량을 구성하는 거더 개수 및 경간길이에 따른 최소중량단면의 변화경향을 분석하기 위하여 거더 개수에 대해서는 2주형, 3주형, 4주형교를 대상으로 검토하였으며, 경간길이에 대해서는 경간길이가 40m, 50m, 60m 및 70m인 경우에 대해 검토하였다.

2. 고강도 강재의 적용성 검토를 위한 수치해석

2.1 단면력 산출을 위한 구조해석

고강도 강재의 강교량 적용성을 검토하기 위하여 기본모델로 선정한 교량은 두 개의 거더를 갖는 강합성 플레이트 거더교(이하 2주형교)로서 대상교량의 종단면도 및 횡단면도는 그림 1과 같다. 대상교량은 1등교이며, 주부재는 SM570 강재로 설계되었다.

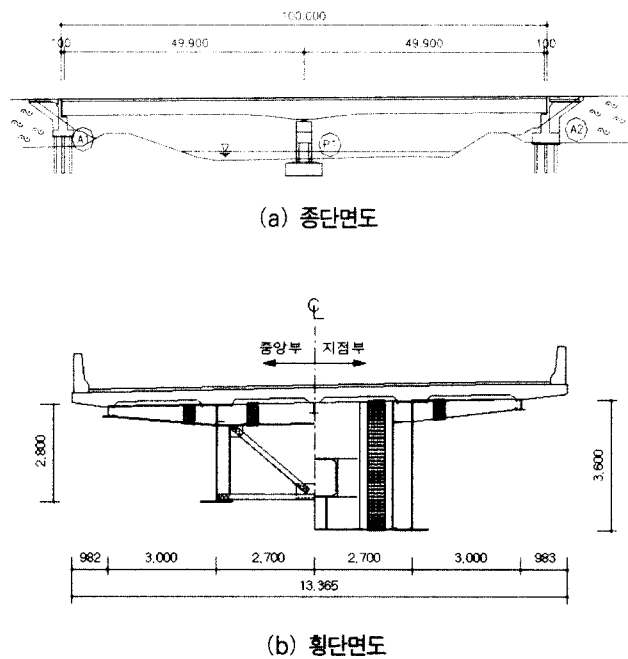


그림 1. 대상교량의 일반도

교량의 거더 개수 및 경간길이 변화에 따른 영향을 검토하고자 그림 1에 나타낸 기본모델의 거더 개수 및 경간길이를 변화시켰는데, 이때 해석대상 구조물의 강성차이에 의한 해석 결과의 편차를 최소화하기 위해 거더의 발생응력이 가급적 일정하게 되도록 배려하였다. 이에 대한 내용은 다음 절에서 기술하기로 한다.

활하중 횡분배의 영향 및 편측재하 효과 등이 충분히 고려될 수 있도록 해석대상 교량을 격자구조로 모델링하였으며⁽⁵⁾, 구조해석은 범용 유한요소해석프로그램인 SAP90을 이용하여 수행하였다. 해석대상 교량에 대한 구조해석은 고정하중과 활하중만을 고려하여 실시하였는데, 이것은 본 해석의 목적이 해석변수에 따른 상대적인 비교를 통하여 고강도 강재의 적용성을 검토하는 것이므로 교량의 주하중인 고정하중과 활하중만을 고려하더라도 충분히 만족할만한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되었기 때문이다. 한편, 적용 활하중, 활하중 재하방법 및 하중조합은 AASHTO의 LFRD 설계기준에 준하였다.

2.2 거더 개수 및 경간길이에 따른 교량단면 선정

교량의 거더 개수 및 경간길이 변화에 따른 고강도 강재의 강교량 적용성을 검토하고자 거더 개수가 2개, 3개 및 4개인 경우와 경간길이가 40m, 50m, 60m 및 70m인 경우를 상정하였다. 이에 따라 그림 1에 나타낸 경간길이 50m인 2주형교를 기본모델로 하여 경간길이가 50m인 3주형교와 4주형교 및 경간길이가 40m, 60m, 70m인 2주형교의 단면을 구조해석을 통해 산정하였다. 해석대상 구조물의 강성차이에 의한 해석결과와 편차를 최소화하기 위해 반복적인 구조해석을 통하여 각 해석대상 교량의 경간 중앙부(이하 정모멘트 단면)와 내측 지점부(이하 부모멘트 단면)에서 발생하는 고정하중과 활하중에 의한 응력의 합이 거의 동일한 수준이 되도록 거더의 단면을 결정하였다. 경간길이가 50m인 경우의 거더 개수에 따른 정·부모멘트 단면의 발생응력을 비교하여 나타낸 그림 2에 의하면 2주형교에 대한 응력의 편차가 최대 5% 미만으로서 상호간 발생응력이 유사함을 알 수 있다.

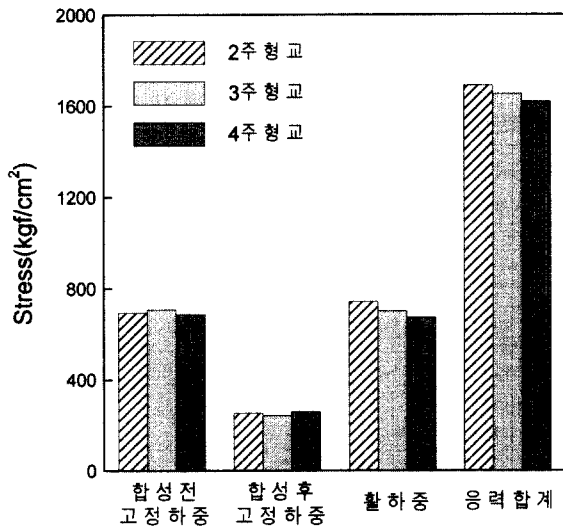
반복계산을 통해 결정된 각 해석대상 교량 거더의 기본 재원을 표 1에 정리하여 나타내었다.

2.3 LFRD에 의한 단면 검토

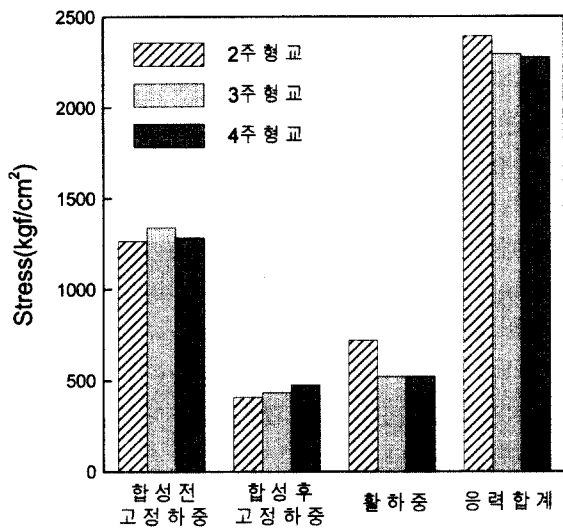
현재 강구조물에 대한 국내의 설계기준⁽⁶⁾은 허용응력설계법에 기초하고 있으나, 여러 제약조건을 고려하여 고강도 강재의 적용성을 검토하고자 하는 경우에 제약조건별로 일관성

표 1. 해석대상 교량의 거더 제원

구 분		정 모 멘 트 단 면			부 모 멘 트 단 면		
		상부플랜지 (b×t)	복 부 (h×t)	하부플랜지 (b×t)	상부플랜지 (b×t)	복 부 (h×t)	하부플랜지 (b×t)
경간길이 50m	2주형교	800×34	2724×20	900×42	800×50	3500×20	960×50
	3주형교	560×34	2424×20	660×42	540×50	2900×20	660×50
	4주형교	600×34	1924×20	700×42	580×50	2400×20	660×50
2주형교	경간 40m	700×34	2324×20	800×42	700×50	2900×20	800×50
	경간 50m	800×34	2724×20	900×42	800×50	3500×20	960×50
	경간 60m	860×34	3324×20	960×42	900×50	4100×30	900×50
	경간 70m	900×50	3600×20	960×50	1000×50	4400×40	1000×50



(a) 정모멘트 단면



(b) 부모멘트 단면

그림 2. 경간길이 50m인 경우의 거더 개수에 따른 발생응력 비교

있는 신뢰도를 주는 하중저항계수설계법(LRFD)이 허용응력 설계법(ASD)에 비해 유용하다고 판단되어 본 연구에서는

AASHTO의 LRFD 설계기준을 적용하였다.

본 연구에서는 AASHTO LRFD에 규정되어 있는 한계상태중에서 대표적인 경우인 강도한계상태, 사용한계상태 및 피로한계상태를 고려하였다. 강도한계상태에 대한 규정은 교량의 설계수명동안 받는 하중에 대하여 충분한 강도와 안전성을 확보하기 위한 것으로서 조밀 및 비조밀 합성단면에 대한 규정은 복부 및 압축플랜지의 세장비와 압축플랜지의 횡방향 지지조건에 따라 검토하도록 되어 있다. 사용한계상태는 교량 공용시 발생하는 응력, 처짐, 균열폭 등을 제한하기 위한 것으로서 탄성적인 처짐과 영구처짐을 모두 검토하도록 규정되어 있다. 한편, 피로한계상태에 대한 규정은 교량의 설계수명동안 예상되는 응력반복회수에 대한 응력범위를 제한하기 위한 것으로서 피로하중에 의한 응력범위를 기준피로강도와 비교하여 검토한다.

2.4 최적화 기법에 의한 최소중량단면 선정

강교량의 경제성을 평가하는 경우에 제작, 운반, 가설 및 유지관리 등 전반적인 비용을 고려해야 하지만, 상부구조형식이 동일한 경우에는 강재중량이 경제성 평가의 가장 중요한 기준이 된다는 점을 고려하여 본 연구에서는 해석의 편의상 최소중량단면을 가장 경제적인 단면으로 간주하여 고강도 강재의 적용성에 대해 검토하였다. 즉, 여기서 언급하는 최소중량단면이란 대상구조물의 구조해석을 통해 선정된 단면력에 대하여 AASHTO의 LRFD 설계기준이 요구하는 각종 규정 및 여러가지 한계상태의 조건을 만족하는 최소중량을 갖는 단면을 의미한다.

본 연구에서는 그림 3에 나타난 과정을 거쳐 최소중량단면을 선정하였다. 즉, 해석대상 교량에 대해 먼저 하중조건과 강재종류를 선택하고, 초기단면을 가정하여 유한요소모델을 작성한 후, 검토대상 위치에서 단면력을 산출하였다. 최초 가정한 단면에 대해 산출된 단면력을 이용하여 AASHTO

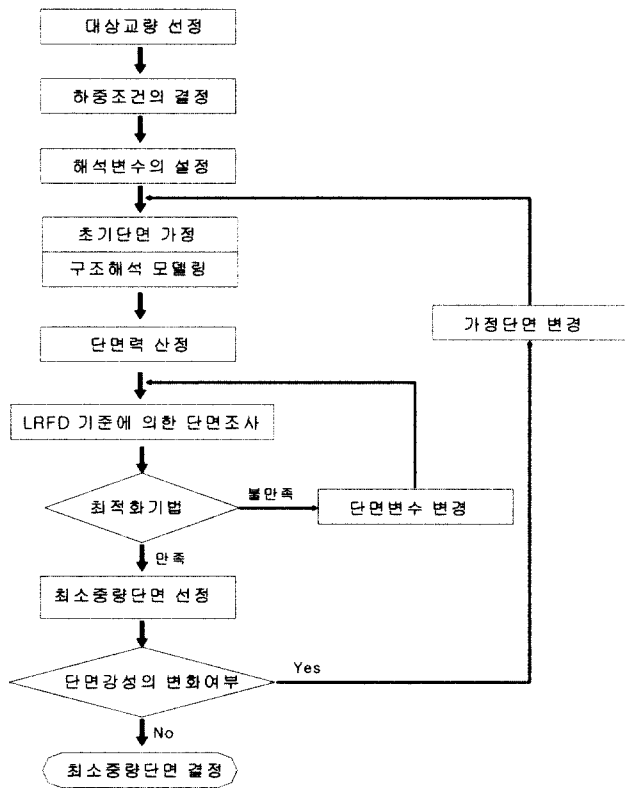


그림 3. 최소중량단면 결정과정

LRFD에 규정된 각종 제약조건 및 한계상태를 만족하도록 거더의 제원을 변화시키면서 검토대상 위치에서 최적화기법에 기초하여 최소중량단면을 산정하였다. 한편, 계산된 최소중량 단면의 강성이 초기가정단면의 강성과 5% 이상의 차이가 있는 경우에는 단면특성을 수정하여 위의 과정을 반복하게 된다.

각 해석대상 교량의 최소중량단면을 산정하기 위해 최적화 프로그램중의 하나인 ADS(a FORTRAN program for Automated Design Synthesis) 소프트웨어⁷⁾를 사용하여 반복적인 단면해석을 수행하였다. 최소중량단면을 산정하기 위해 사용된 최적화방법은 최적해의 신뢰성면에서 우수한 ALM(Augmented Lagrange Multiplier) 방법과 BFGS(Broydon Fletcher Goldforb Shanno) 방법을 사용하였으며, 단일변수함수의 최적해 탐사는 황금분할법(golden section method)을 이용하였다.

본 연구에서는 최대 정·부모멘트 발생위치의 최소중량단면을 결정하기 위하여 표 1 및 그림 4에 나타난 6가지 단면 변수(북부의 두께와 높이, 상·하플랜지 두께와 폭)를 변화시켜가며 단면검토를 실시하였으며, 목적함수는 단면변수의 함수로 계산되는 거더의 단면적에 단위중량을 곱한 함수로 정식화하였다. 한편, 최소중량단면의 산정을 위한 제약조건은 2.3 절에서 기술한 바와 같이 AASHTO의 LRFD 설계기준을 적용하였다.

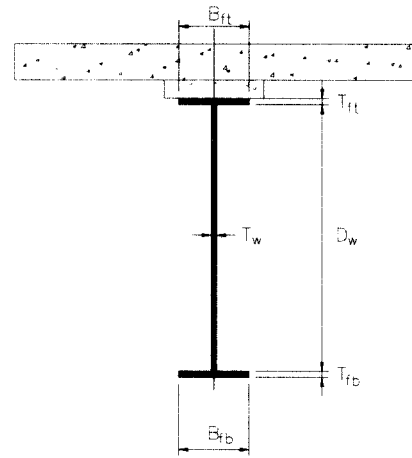


그림 4. 최소중량단면 선정을 위한 단면변수

표 2. 해석변수

해석변수				
강재 종류 (항복강도, kgf/cm ²)	ADTT ^{a)} (대/일)	피로 등급	거더 개수	경간 길이 (m)
· SM400(2400)	· 1000	· B	· 2주형 ^{b)}	· 40
· SM520(3600)	· 2500 ^{b)}	· C	· 3주형	· 50 ^{b)}
· SM570(4600) ^{b)}	· 4000	· D ^{b)}	· 4주형	· 60
· HT70(6000)		· E		· 70
· POSTEN80(7000)				

주 a) ADTT : 일평균 트럭교통량

b) 각 해석변수중 기본이 되는 항목

2.5 최소중량단면의 산정을 위한 해석변수

최소중량단면의 산정을 위해 본 연구에서 고려한 해석변수를 표 2에 정리하여 나타내었다.

구조부재의 항복강도 차이에 따른 고강도 강재의 적용성을 분석하기 위하여 기존에 구조용 강재로서 사용되고 있는 SM400, SM520, SM570강재와 함께 현재 국내에서 개발되어 시판중인 POSTEN80 강재를 대상으로 하였으며, SM570과 POSTEN80의 항복강도 차이가 상당히 크다는 점을 감안하여 일본에서 생산되는 강재인 HT70⁸⁾을 추가적으로 포함시켜 항복강도에 따른 강재중량의 변화경향을 확실하게 파악하고자 하였다.

구조계의 피로거동과 관련된 해석변수인 일평균 트럭교통량과 구조상세의 피로등급은 각각 1000, 2500, 4000대/일과 B~E등급을 대상으로 하였다. AASHTO의 피로에 관한 설계기준에 의하면 고속도로 교량의 차량에 의한 응력반복회수를 2500대/일을 기준으로 하여 산정하도록 규정하고 있으므로, 이에 근거하여 ADTT=2500을 기준으로 하고 이보다

교통량이 적은 경우를 ADTT=1000, 이보다 교통량이 많은 경우를 ADTT=4000으로 설정하였다. 따라서, ADTT=1000인 경우는 중차량의 통행이 많지 않은 일반국도상의 교량에 해당되며, ADTT=4000인 경우는 항만이나 부두 등과 같이 중차량의 통행이 빈번한 특수지역에 건설된 교량에 해당된다. 피로등급의 경우에는 강합성 플레이트 거더교에 적용되는 구조상세가 대부분 B~E등급에 포함된다는 점을 고려한 것이다.

한편, 최근 강교량의 합리화를 통한 경제성 향상을 위해 2주형교의 적용이 증가하는 추세이며, 일반적으로 13m 정도의 교폭인 경우에 4주형교로 설계된다는 점을 감안하여 해석 대상 교량의 거더 개수가 2개, 3개 및 4개인 경우에 대해 고강도 강재의 적용성을 검토하였다. 경간길이에 대해서는 40~70m인 경우를 해석변수로서 취하였는데, 이는 강합성 플레이트 거더교의 일반적인 적용 경간길이가 40~50m이라는 점과 거더교 교량의 장경간화가 현재의 경향임을 감안한 것이다.

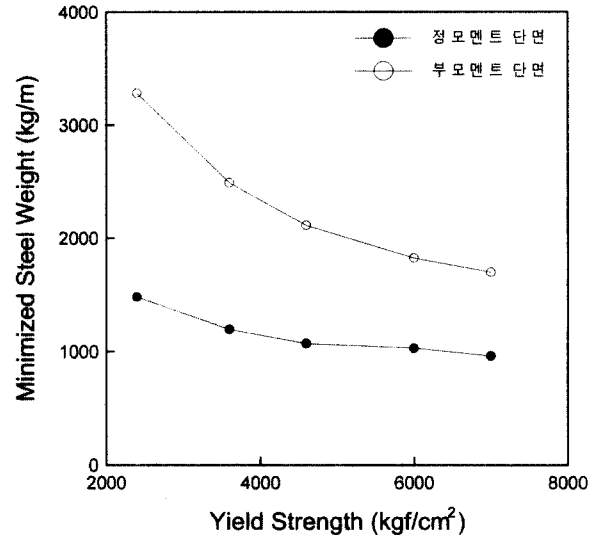
3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 항복강도의 영향

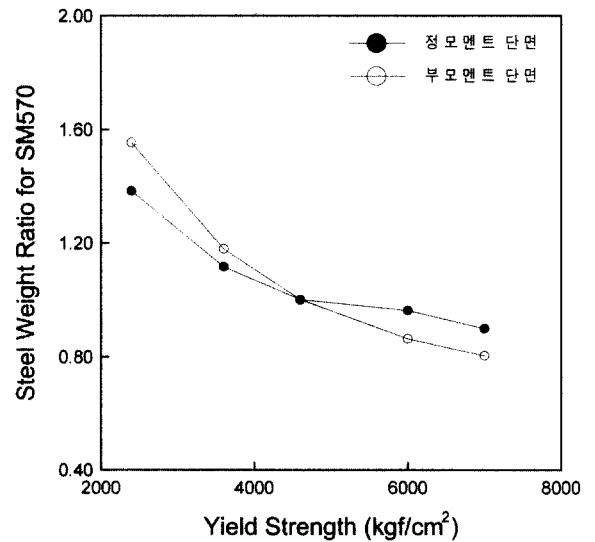
강재의 항복강도 변화에 따른 영향을 검토하고자 경간길이 50m인 2주형교에 대한 해석결과를 그림 5에 나타내었다. 우선, 피로의 영향이 배제된 상태에서의 강재중량 변화를 파악하고자 그림 5에는 피로한계상태에 대한 검토를 생략한 상태에서 산출된 결과를 나타내었다. 또한, 표 3에는 정모멘트 단면에 대한 각 해석경우에서 단면제원을 지배하는 한계상태를 정리하여 나타내었다.

그림 5에 나타낸 결과에 의하면 강재의 항복강도별 강재중량의 변화경향은 항복강도가 증가함에 따라 전반적으로 강재중량이 감소하는 경향을 나타내지만 고강도화될수록 감소경향이 다소 둔화됨을 알 수 있다. SM570 강재를 기준으로 하여 나타낸 그림 5(b)를 살펴보면 부모멘트 단면이 정모멘트 단면에 비해 강재의 고강도화에 의한 영향이 보다 크다는 것을 알 수 있다. 수치적으로 살펴보면 부모멘트 단면의 경우에 POSTEN80 강재의 중량은 SM570 강재의 80.3%, SM400 강재는 SM570 강재의 155.4%인데 비하여 정모멘트 단면은 POSTEN80 및 SM400의 강재중량이 각각 SM570 강재의 89.8%와 138.4%이다.

한편, 피로의 영향이 배제된 상태에서의 각 해석경우에 대한 단면지배 한계상태를 나타낸 표 3에 의하면 정모멘트 단면의 모든 경우에서 사용한계상태에 의해 단면이 결정되고 그림 5(a)에서 전체 범위에 걸쳐 기울기의 변화가 크지 않다는



(a) 단위길이당 최소강중



(b) SM570 강재에 대한 중량비

그림 5. 강재의 항복강도 변화에 따른 영향

표 3. 피로의 영향이 배제된 상태에서의 각 해석경우별 단면지배 한계상태

구분	단면지배 한계상태				
	SM400	SM520	SM570	HT70	POSTEN80
정모멘트 단면	사용한계 상태	사용한계 상태	사용한계 상태	사용한계 상태	사용한계 상태

것을 알 수 있는데, 이로부터 강교량의 사용성은 구조부재의 고강도화에 의해 지배된다기 보다는 강재 자체의 고유특성인 유연성에 좌우되는 것으로 사료된다. 따라서, 강교량을 계획하는 경우에 구조부재의 단면을 효율적으로 활용하기 위해서는 사용강재의 강도와 관계없이 처짐에 대해 충분한 배려가 필요하다고 판단된다.

3.2 피로의 영향

3.2.1 ADTT의 영향

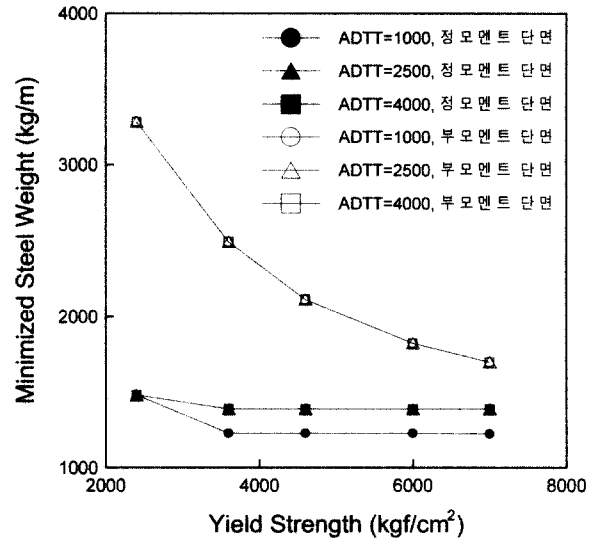
피로의 영향을 고려하는 경우에 일평균 트럭교통량(Average Daily Truck Traffic, ADTT)이 고강도 강재의 적용성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 50m의 경간길이를 갖는 2주형교를 대상으로 최소중량단면을 선정하여 그림 6에 나타내었다. 피로한계상태에 대한 단면검토시 구조상세의 피로등급은 AASHTO 및 도로교 설계기준의 D등급을 적용하였는데, D등급은 2주형교의 구조상세중 거의 최하위 등급이고 이에 해당하는 구조상세는 모재와 두께가 다른 거세트 플레이트의 용접이음부(용접부 다듬질)이다. 또한, 표 4에는 각 해석경우에서 단면을 지배하는 한계상태를 정리하여 나타내었다.

부모멘트 단면의 최소강재중량은 동일 강종에서 ADTT의 변화와 무관하게 일정한 값을 갖는데, 이는 표 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 부모멘트 구간의 단면은 피로한계상태가 아닌 강도한계상태에 의해 지배되기 때문이다. 부모멘트 구간의 경우에는 인장영역의 연단거리가 정모멘트 구간에 비해 상대적으로 짧아 활하중에 의한 응력수준이 그다지 높지 않기 때문으로 판단된다. 정모멘트 단면의 경우에는 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 피로한계상태가 단면을 지배하게 되어 SM520 강재 이상의 항복강도를 갖는 강재에서 항복강도 증가에 따른 강재중량 감소가 나타나지 않으며, SM400 강재와 SM520 강재의 차이도 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 또한, ADTT가 2500인 경우와 4000인 경우는 거의 동일한 결과를 나타내며, ADTT가 1000으로 감소하는 경우에도 약 10% 정도만의 강재중량 감소가 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 구조상세의 공칭피로강도가 재료 자체의 강도와는 무관하게 규정된다는 사실에 기인한다.

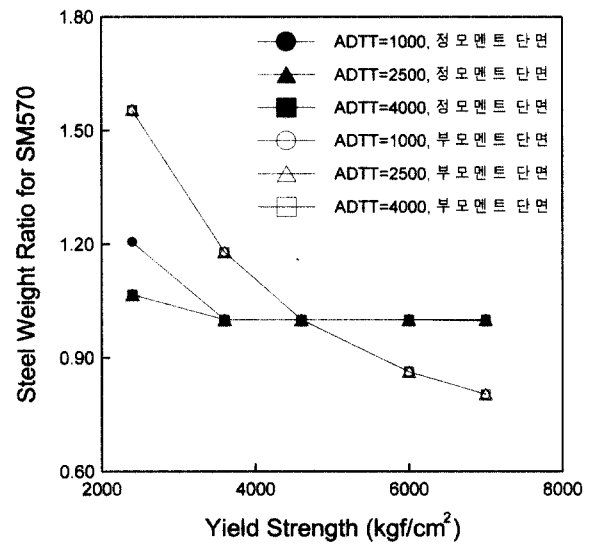
앞절에서 언급한 정모멘트 단면의 사용한계상태와는 달리 SM520 강재부터 거의 일정한 강재중량을 가지고 피로한계상태가 제약조건이 된다는 점을 감안할 때 고강도 강재의 강교량 적용성은 피로에 의한 영향이 가장 지배적인 것으로 판단된다.

3.2.2 피로등급의 영향

강구조의 피로현상에 있어서 주요한 영향인자중의 하나인 구조상세의 피로등급 변화에 따른 고강도 강재의 적용성을 검토하고자 경간길이가 50m인 2주형교의 정모멘트 구간에서 ADTT가 2500인 경우에 대해 수치해석을 하였다. 부모멘트 구간의 경우에는 앞서 살펴본 바와 같이 강도한계상태에 의해 단면이 결정되므로 해석대상에서 제외하였다. 본 연구대상 2주형교에 적용된 구조상세중 대표적인 경우를 그림 7에 나타내었다.



(a) 단위길이당 최소강중



(b) SM570 강재에 대한 중량비

그림 6. ADTT의 변화에 따른 영향

표 4. 각 해석경우의 단면지배 한계상태

구분	단면 지배 한계 상태					
	ADTT	SM400	SM520	SM570	HT70	POSTEN80
정 모멘트 단면	0	사용한계 상태	사용한계 상태	사용한계 상태	사용한계 상태	사용한계 상태
	1000	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태
	2500	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태
	4000	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태	피로한계 상태
부 모멘트 단면	0	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태
	1000	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태
	2500	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태
	4000	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태	강도한계 상태

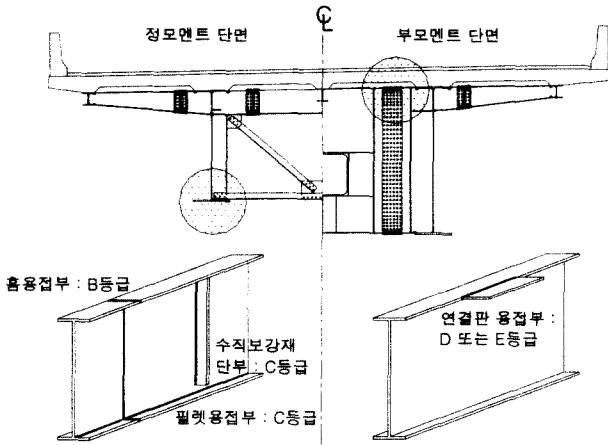
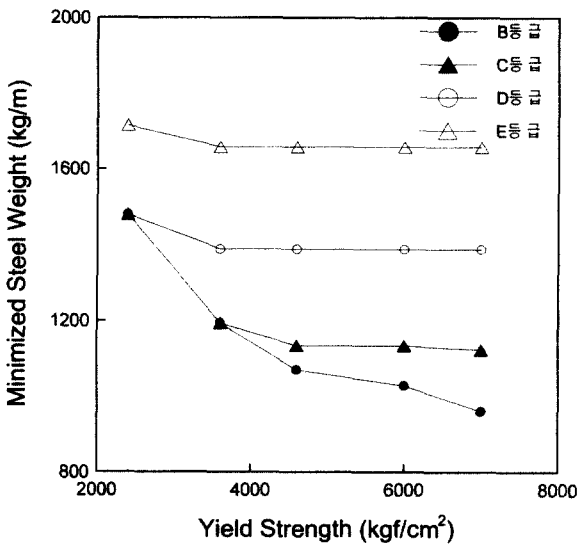


그림 7. 연구대상 교량에 적용된 대표적인 구조상세

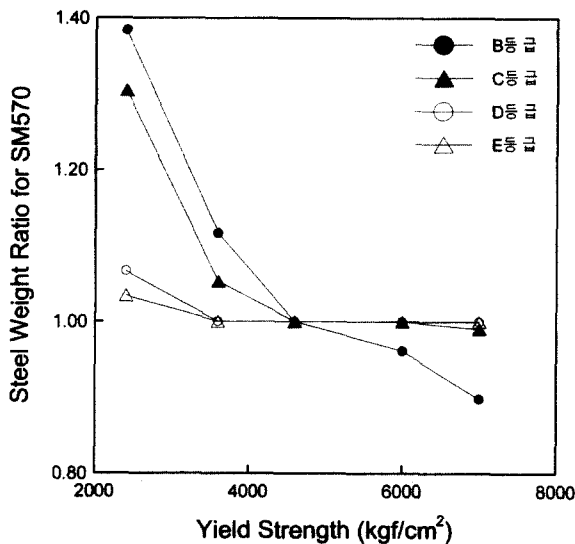
그림 7에 나타낸 바와 같이 검토하고자 하는 정모멘트 단면의 경우에는 피로에 대한 저항성이 비교적 양호한 B 또는 C등급이 주를 이루지만, 부모멘트 단면은 최하 E등급의 구조상세도 포함된다. 본 연구에서는 정모멘트 단면만을 대상으로 하므로 해석시 고려하는 피로등급을 B와 C등급으로 한정하여도 무방하리라고 판단되지만, 현재까지 국내에서 2주형교의 구조형식이 정형화되어 있지 않아 본 연구대상 교량과 상이한 구조상세가 적용될 수 있다는 점과 피로등급에 따른 강재중량 변화경향을 보다 정확히 파악한다는 측면에서 검토대상 구조상세의 피로등급을 B~E등급으로 하였다.

수치해석을 통해 얻어진 피로등급 변화에 따른 최소강재중량을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)에 의하면 피로에 대해 가장 유리한 B등급의 경우에는 재료의 항복강도가 증가할수록 최소강재중량은 감소하는 경향을 나타내며, C등급의 경우에는 SM570 강재 이상의 항복강도에서 일정한 값에 수렴한다는 것을 알 수 있다. 한편, D 및 E등급의 경우에는 항복강도의 차이에 의한 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이로부터 SM570 강재 이상의 항복강도를 갖는 고강도 강재를 효율적으로 이용하기 위해서는 정모멘트 구간에 적용되는 피로등급이 최소 C등급 이상은 되어야 함을 알 수 있다.

ADTT 및 피로등급을 해석변수로 취해 수치해석한 결과를 종합적으로 고려하면 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성은 피로에 의한 영향이 가장 지배적임을 알 수 있었다. 따라서, 고강도 강재를 강교량에 효율적으로 활용하기 위해서는 피로강도를 향상시키기 위한 구조상세 개선에 관한 연구, 용접부의 품질 향상, 설계시 적절한 구조상세의 선택 등 다양한 분야에 걸친 노력이 필요하다고 사료된다.



(a) 단위길이상 최소강중

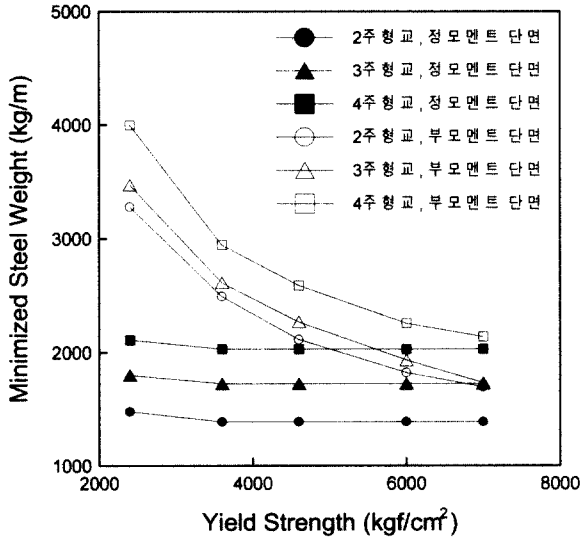


(b) SM570 강재에 대한 중량비

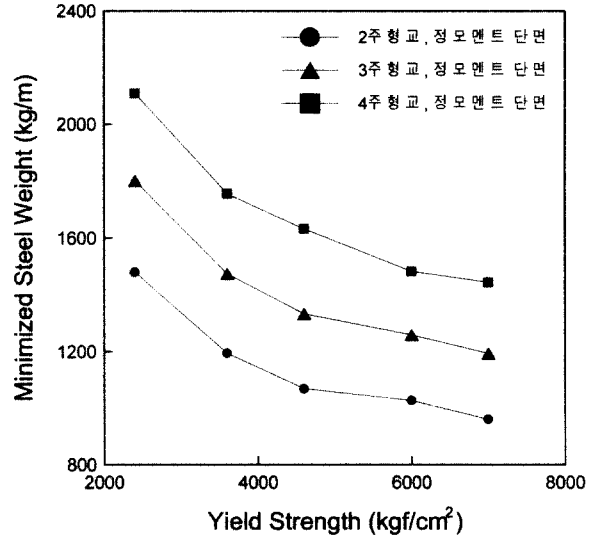
그림 8. 피로등급의 변화에 따른 영향

3.3 거더 개수의 영향

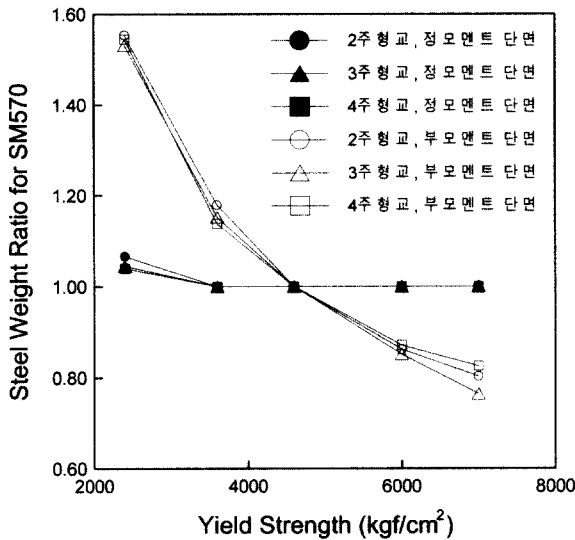
본 절에서는 50m의 경간길이를 갖는 2주형교, 3주형교 및 4주형교를 대상으로 거더 개수의 변화가 고강도 강재의 적용성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 피로에 대한 고려 여부에 따른 영향도 함께 고찰하고자 피로의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 구분하여 수치해석을 하였다. 피로의 영향을 고려하는 경우에 있어서의 피로한계상태에 대한 단면검토는 본 연구에서 대상으로 하고 있는 구조상세중 비교적 피로에 취약한 등급으로 판단되는 D등급의 구조상세를 대상으로 하였으며, ADTT는 2500대를 적용하였다. 피로의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 해석결과를 각각 그림 9 및 그림 10에 나타내었다. 부모멘트 단면의 경우에는 단면제원이 강도한계상태에 지배되어 피로의 고려여부와 관계없이 동일한 결과를 나타내므로 그림 10에는 정모멘트 단면에 대한 결과만을 나타내었다.



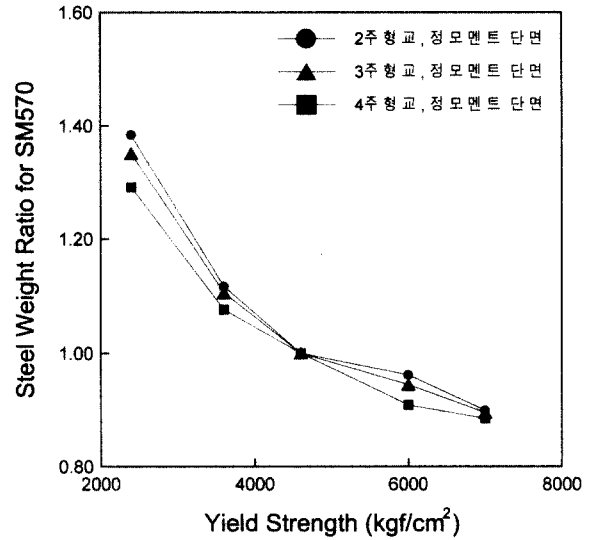
(a) 단위길이당 최소강중



(a) 단위길이당 최소강중



(b) SM570 강재에 대한 중량비



(b) SM570 강재에 대한 중량비

그림 9. 거더 개수의 변화에 따른 영향(피로 영향 고려)

그림 10. 거더 개수의 변화에 따른 영향(피로 영향 무시)

피로의 영향을 고려하는 경우에 대해 강재의 항복강도별로 거더 개수의 변화에 따른 최소강재중량을 나타낸 그림 9(a)에 의하면 정모멘트 단면은 피로의 영향에 의해 동일한 구조형식에서 강재의 항복강도 변화와 무관하게 거의 일정한 값을 나타내며, 부모멘트 단면은 구조형식마다 강재중량 자체는 차이가 있지만 거의 유사한 기울기를 가지고 항복강도 증가와 함께 강재중량이 감소하는 경향이 있다. 또한, 동일한 강재종류를 대상으로 강재중량만을 단순히 비교하면 전체적으로 거더 개수가 증가할수록 강재중량은 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 그러나, 이러한 경향은 사용강재의 항복강도와는 무관한 것이다. 그림 9(b)는 각 구조형식에서 SM570 강재를 기준으로 강재중량비를 나타낸 것인데, 이에 의하면 거더 개

수에 관계없이 강재중량비가 최대 10% 미만의 편차를 갖고 거의 일정한 수치에 수렴한다는 것을 알 수 있다.

한편, 피로의 영향이 배제된 경우에 대한 결과인 그림 10(b)에 의하면 일반 용접구조용 강재(SM400, SM520) 영역에서는 4주형교의 기울기가 가장 작아 4주형교의 효율이 낮은 반면에 고강도 강재(HT70, POSTEN80) 영역에서는 오히려 2주형교의 효율이 다소 저하하는 것으로 나타나 구조계의 거더 개수에 따른 고강도 강재의 적용성을 정확히 평가하기는 어렵다. 그러나, 2주형교의 경우가 전체 범위에 대한 편차가 가장 크므로 전체적으로 볼 때는 2주형교가 다소 유리함을 알 수 있다.

상기의 사실을 종합해 볼 때 피로등급이 낮은 구조상세에

대해서는 고강도 강재의 적용성은 거더 개수와는 무관한 것으로 판단되나, 피로특성의 향상 등을 통해 피로문제를 개선하는 경우에는 구조계의 소수주형화가 고강도 강재의 활용성 측면에서 보다 유리한 것으로 판단된다.

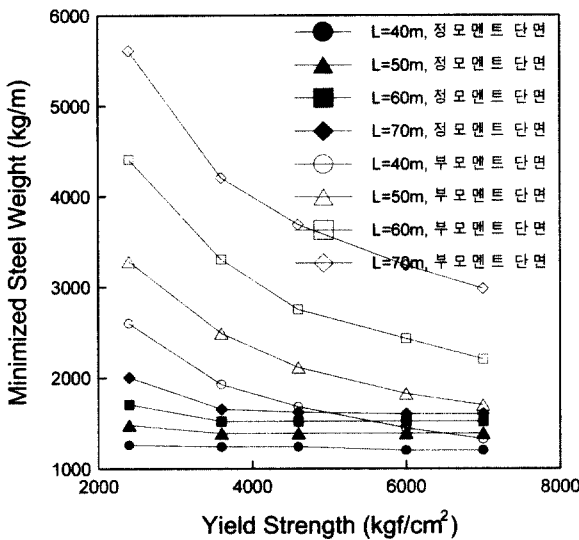
3.4 경간길이의 영향

교량의 경간길이가 고강도 강재의 적용성에 미치는 영향을 검토하고자 40m, 50m, 60m 및 70m의 경간길이를 갖는 2주형교를 대상으로 수치해석하였다. 피로에 관한 해석변수는 3.3절의 경우와 동일하게 피로의 영향을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우로 구분하였다. 피로의 영향을 고려하는 경우의 피로등급 및 ADTT는 각각 D등급과 2500대이다. 피로

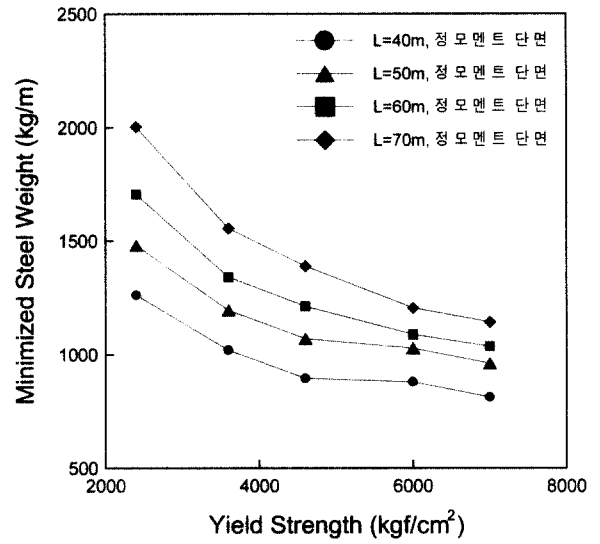
의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 해석결과를 각각 그림 11 및 그림 12에 나타내었다.

피로의 영향을 고려하는 경우에 대해 강재의 항복강도별로 경간길이의 변화에 따른 최소강재중량을 그림 11(a)에 나타내었다. 그림 11(a)에 의하면 3.3절의 거더 개수의 영향에서 살펴본 바와 같이 정모멘트 단면은 피로의 영향에 의해 동일한 구조형식에서 강재의 항복강도 변화와 무관하게 거의 일정한 값을 나타내며, 부모멘트 단면은 구조형식마다 강재중량 자체는 차이가 있지만 거의 유사한 기울기를 가지고 항복강도 증가와 함께 강재중량이 감소하는 경향이 있다.

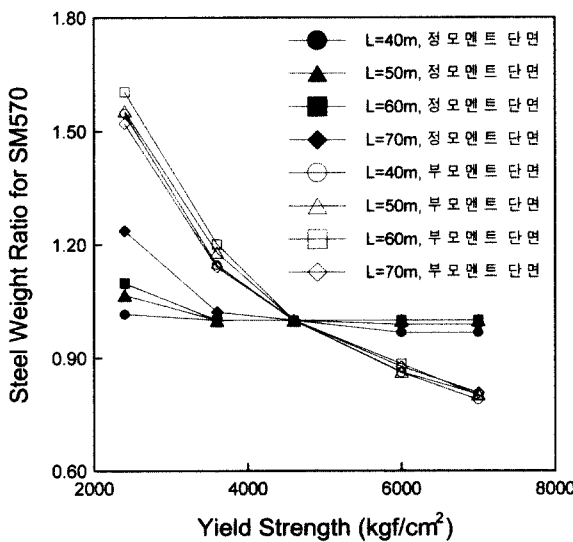
각 경간길이에 대한 해석을 통해 얻어진 강재중량을 SM570 강재의 중량을 기준으로 하여 강재중량비로서 나타낸 그림 11(b)를 살펴보면 정모멘트 단면의 SM400 강재의



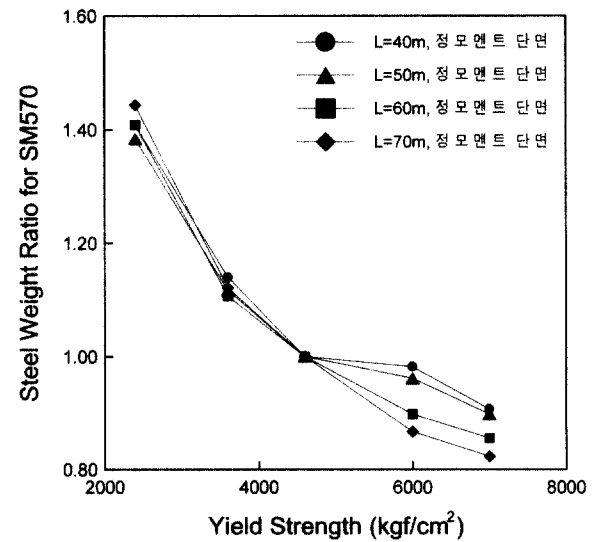
(a) 단위길이에 따른 최소강중



(a) 단위길이에 따른 최소강중



(b) SM570 강재에 대한 중량비



(b) SM570 강재에 대한 중량비

그림 11. 경간길이의 변화에 따른 영향(피로 영향 고려)

그림 12. 경간길이의 변화에 따른 영향(피로 영향 무시)

해석결과를 제외한 모든 경우에서 경간길이의와는 무관하게 적은 오차범위내로 수렴하는 것을 알 수 있다. 정모멘트 단면의 SM400 강재의 경우는 경간길이가 증가할수록 강재중량이 증가하는 경향이 뚜렷함을 알 수 있다. 그러나, SM400 강재는 거더교의 주부재로 적용되는 경우가 거의 없어 이에 대한 해석결과를 배제하여도 전체적인 경향을 파악하는데는 문제가 없다고 사료되며, 이에 따라 피로의 영향이 고려되는 경우에는 2주형교의 경간길이의와 고강도 강재의 적용성은 별개의 것으로 취급하여도 무방하다고 판단된다.

한편, 피로의 영향이 배제된 경우에 대한 해석결과인 그림 12(a) 및 (b)에 의하면 장경간화 됨에 따라 기울기가 커지고, 고강도 강재 영역에서 강재 중량의 감소 비율이 증가하는 것이 확연히 나타나 피로의 영향이 무시되는 경우에는 구조계의 장경간화가 고강도 강재의 효율성을 증가시키는 요인임을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 경간길이가 고강도 강재의 적용성에 미치는 영향은 3.3절의 경우와 유사하게 피로에 의해 좌우되므로 피로의 영향을 최소화시킬 수 있는 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 중소규모의 일반 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성을 수치해석적으로 검토하였으며, 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정모멘트 단면은 AASHTO LRFD 설계기준의 피로 한계상태에 의해 단면이 지배되는 반면에 부모멘트 단면은 강도한계상태에 의해 단면이 결정된다.
- (2) 정모멘트 단면은 피로의 영향에 의해 사용강재의 항복강도 증가에 따른 강재중량의 감소 효과가 급격히 감소한다.
- (3) SM570 강재 이상의 항복강도를 갖는 고강도 강재를 효율적으로 이용하기 위해서는 정모멘트 구간에 적용되는 구조상세의 피로등급이 최소 C등급 이상 확보되어야 한다.
- (4) 고강도 강재는 정모멘트 단면보다는 부모멘트 단면에서 효율적이다.
- (5) 피로의 영향을 고려하는 경우에는 구조계의 거더 개수 및 경간길이의 변화에 따른 고강도 강재의 효율성은 나타나지 않았으나, 피로의 영향을 배제하는 경우에는 구조계의 소수주형화 및 장경간화가 고강도 강재의 적용성 측면에서 유리하다.

- (6) 강교량의 사용성은 구조부재의 고강도화에 의해 지배된다고 보다는 강재 자체의 고유특성인 유연성에 좌우되므로 강교량 구조부재의 단면을 효율적으로 활용하기 위해서는 사용강재의 강도와 관계없이 처짐에 대해 충분한 배려가 필요하다.

강재중량을 기준으로 고강도 강재의 적용성을 검토한 본 연구를 통해 중소규모의 일반 강교량에 대한 고강도 강재의 적용 가능성을 정성적으로 확인할 수 있었다. 그러나, 고강도 강재를 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 가장 지배적인 영향인자인 피로문제에 대한 적절한 대처가 관건이므로 피로강도를 향상시키기 위한 구조상세 개선에 관한 연구, 용접부의 품질 향상, 설계시 적절한 구조상세의 선택 등 다양한 분야에 걸친 노력이 필요하다고 사료된다. 한편, 강교량에 대한 고강도 강재의 적용성을 보다 정량적으로 평가하기 위해서는 강재 및 제작 단가 등을 고려한 연구도 뒷받침되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 한국강구조학회와 POSCO가 “고강도강 교량 적용 설계 및 제작 기술개발 연구”의 일환으로 수행된 결과물로서 관계자 여러분께 심심한 감사의 뜻을 표하는 바입니다. 또한, 본 연구를 위한 수치해석에 도움을 준 문도영군 및 민대홍군에게도 감사의 마음을 전합니다.

참고 문헌

1. (社)日本鋼構造協會, 合理化桁に關するデザインマニュアル, 2000.
2. 堀田毅, 西村宜男, “鋼2主桁橋梁架設系の横ねじれ座屈強度特性”, 日本土木學會論文集, No.612, pp.287-296, 1999.
3. 大垣賀津雄, 川口喜史, “合成2主桁橋の鋼主桁補強設計に關する實驗的研究”, 構造工學論文集, Vol.44A, pp.1229-1239, 1998.
4. AASHTO, LRFD Design Specification, 1998.
5. Bakht, B., and Jaeger, L.G., Bridge Analysis by Microcomputer, McGraw-Hill Book Co., 1989.
6. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 2000.
7. Vanderplaats, G.N., ADS-A FORTRAN Program for Automated Design Synthesis, Engineering Design Optimization Inc., 1987.
8. 深澤誠, 大田孝二, “鋼材の種類(その1)”, 橋梁と基礎, Vol.29, No.5, pp.36-42, 1995.

(접수일자 : 2002년 8월 19일)