

프리플렉스 거더의 고강도강 적용을 위한 검토

장 응 성 · 경 갑 수 · 방 한 서

Consideration for Application of Higher Strength Steel to Preflex Girder

Woong-Seong Chang, Kab Soo Kyung and Han and Sur Bang

1. 서 론

다른 형식의 거더교에 비해 거더 높이가 낮은 프리플렉스 거더는 교량 하부공간에 제한이 있는 경우에 적용할 수 있는 대표적인 강교량 형식이다. 프리플렉스 합성거더는 소정의 상향 솟음을 준 강재 거더에 preflexion하중을 재하시킨 후, 하부 플랜지에 콘크리트를 타설하고 하부 플랜지 콘크리트가 소정의 강도를 발휘하면 preflexion하중을 재하시켜 하부 콘크리트에 prestress의 압축응력을 도입하여 합성 거더교가 되도록 하는 것이 이 교량의 특징이다.

1986년 국내도입과 함께 1986년 토목학회에서 시방서(안)^{1,2)}이 제정된 이후, 지속적인 증가를 보여 최근 3년사이에는 년 40,000톤의 프리플렉스 합성거더교가 건설되고 있으나, 국내의 프리플렉스 합성거더 설계기준은 86년에 제정된 시방서(안)을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 이에 비해 일본의 경우는 프리플렉스 합성거더의 도입 이래 지속적인 연구결과에 의해 현재 시공성 및 경제성을 크게 향상시킨 극후판의 SM570의 고강도강재를 사용한 프리플렉스 합성거더의 분할공법 및 연속화 공법에 의해 지간의 장대화, 제작의 단순화 및 고품질화 등을 도모한 합리화 프리플렉스 거더교를 도입하여 프리플렉스 합성 거더교의 경쟁력을 강화시키고 있다. 이러한 변화의 시대에 국내 프리플렉스 합성거더교에서도 기존의 설계기준의 정립과 합리화 기법 및 고강도 강재의 적용성을 도입한다면 보다 효율적이고 경제성을 향상시킨 합리적인 프리플렉스 합성거더교의 건설이 가능할 것으로 판단된다.

따라서, 본 기사에서는 보다 효율적이고 기능이 우수한 프리플렉스 합성거더를 건설하기 위해 국내·외의 기준을 조사하여 설계 및 제작 방법에 대해 검토하고, 이를 토대로 프리플렉스 합성거더에 관한 기준을 정립하여 프리플렉스 합성거더의 설계, 제작 기술의 선진화 및 대외 경쟁력을 확보하는데 목적이 있다.

2. 프리플렉스 합성거더의 특징

프리플렉스거더는 I형 단면을 지닌 강 beam에 굽힘 변형을 일으키는 하중을 부여하여 인장 측 플랜지 주위로 콘크리트를 타설, 경화시킨 후 강 beam에 부여된 하중을 제거함으로써 이 콘크리트에 압축 prestress를 도입하는 구조 형식을 일컫는다. 이러한 프리플렉스 거더의 제조방법, 장점, 그리고 국내 적용현황 등에 대하여 정리하였다.

2.1 프리플렉스 합성거더 제작방법

일반적인 프리플렉스 합성거더의 단계별 제작순서는 Table 1과 같고, 위의 각 시공 단계별 프리플렉스 합성거더의 응력은 Table 2와 같다.

현재 국내의 '86 프리시방에서는 콘크리트의 균열을 인정하지 않는 설계 개념을 적용하고 있으므로 단계 (i)상태까지만 고려하고, 단계(j)의 상태에 대해서는 고려하고 있지 않다. 그러나, 일본의 경우는 RC와 같이 균열을 인정하는 설계 개념을 적용하고 있으므로 단계 (j)상태에 대해서도 응력 검토를 실시하고 있다.

2.2 프리플렉스 합성거더의 장점

일반적인 프리플렉스 합성거더의 장점은 다음과 같다.

- (1) 거더 높이를 낮게 할 수 있다.
다른 교량 형식의 거더와 거더 높이가 유사한 경우 거더 강성이 크며 활하중 처짐이 작으므로 거더 높이에 제한을 받는 경우에 유리하다.
- (2) 선형이 우수하다.
도로의 선형에 따라 변단면, 헌치 형상 등의 구조를 용이하게 만들 수 있으며, 강재 거더가 매설되므로 확폭의 처리나 도로 종단에 맞추어 변단면 거더로의 적용이 용이하다.

Table 1 프리플렉스 합성거더의 단계별 제작순서


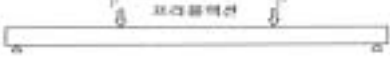




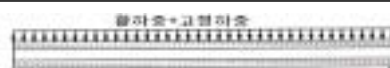


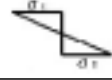
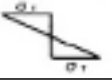

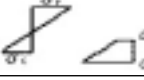
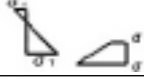





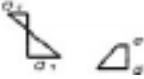

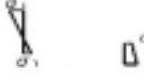






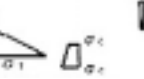

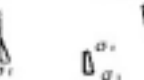
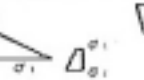



단계	시공상태	개요
(1)		소정의 캠버를 준 I형의강재 거더가 제작 완료된 상태
(2)		프리플렉션 하중 P_1 를 재하하여 설계모멘트만큼의 휨모멘트를 부가
(3)		(2)의 상태에서 하부 플랜지에 콘크리트를 타설
(4)		하부플랜지 콘크리트가 경화된 후 하중 P_1 를 제거하고, 하부 콘크리트에 압축력을 도입하여 프리플렉스 거더를 완성
(5)		프리플렉스거더를 가설하고, 복부, 가로보, 바닥판의 콘크리트 타설
(6)		프리플렉스 거더와 바닥판 이 합성되고, 포장, 난간 등의 합성후 고정하중이 작용
(7)		활하중 작용

Table 2 시공 단계별 프리플렉스 합성거더의 응력

상태	응력저항단면	발생응력 바닥판콘크리트응력 강거더응력 하부플랜지콘크리트응력 하부플랜지축방향철근응력	누계응력 바닥판콘크리트응력 강거더응력 하부플랜지콘크리트응력 하부플랜지축방향철근응력
(a) 강제거더완성			
(b) 프리플렉션			
(c) 릴리즈			
(d) 프리플렉스거더 자중재하			
(e) 하부플랜지 콘크리트의 크리프, 건조수축			
(f) 바닥판, 가로보 콘크리트 타설			
(g) 합성후 사하중 재하			
(h) 바닥판 콘크리트크리프 건조수축 및 하부플랜지콘크리트 종료			
(i) 환하중재하 (하부플랜지콘크리트 응력검토)			
(j) 활하중재하 (강재거더, 바닥판콘크리트, 하부플랜지 콘크리트 축방향철근 응력검토)			

- (3) 소음이 적다.
충분한 강성 및 어느 정도의 중량이 있으므로 진동에 의한 소음 발생이 적다
- (4) 도장이 필요가 없다.
거더 전체가 콘크리트로 덮여 있으므로 도장이 필요 없으며, 유지관리비 저감을 도모할 수 있다.
- (5) 작업 야드가 없는 경우에도 대응할 수 있다.
분할공법을 사용하면 가설현장에 응력 도입 야드가 없는 경우에도 적용할 수 있다.
- (6) 가설이 용이하다.
1개당 가설시의 중량이 PSC거더 보다 가볍고, 또 가설시 거더 중심이 낮아 취급이 간단하며 시공이 용이하다.
- (7) 연속화가 가능하다.
연속화의 적용에 의해 경제성 향상을 추구할 수 있다.

2.3 국내의 프리플렉스 합성거더교의 현황

2002년까지 현재 시공되었거나 시공중인 프리플렉스 합성거더교를 조사한 결과 도로교(육교 포함) 532교, 철도교 88교, 건축물 53건의 실적을 갖고 있다. Table 3에 나타낸 것과 같이 지간이 20~40m인 경우가 3/4을 차지한다. 또한 거더 높이/지간길이의 비가 파악 가능한 교량을 대상으로 이들의 비를 Table 4에 나타내었는데, 1/20~1/30의 교량이 전체의 약 90%를 차지하고 있으며, 최소값은 1/34 이다. 교량에서는 30~40m, 건축물에서는 20m이하가 가장 많이 시공된 것을 알 수 있으며, 도로교에서는 국도에 적용 실적이 가장 높은 것을 알 수 있다.

3. 프리플렉스 합성거더의 고강도강재 적용 검토

국내의 고강도강재 사용실적을 보면 현수교로는 영종

Table 4 국내에 시공된 프리플렉스 합성거더교의 거더 높이/지간길이 비

거더높이/지간길이	도로교 비율	건축물비율
~1/20	3(6.52%)	30(58.82%)
1/20~1/25	28(60.87%)	16(31.36%)
1/25~1/30	15(32.61%)	4(7.84%)
1/30~1/35	0(0%)	1(1.96%)
1/35~	0(0%)	0(0%)
계	46	51

대교와 광안대교가 있으며, 아치 트러스교의 경우는 방화대교, 일반교량의 경우는 대구-포항 고속도로 등의 2주형 형식의 강교량에 SM570 강재가 사용되었다. 고강도강재의 사용은 상부구조의 지중을 경감시켜 경제적인 구조물의 건설이 가능하며, 또 미관에도 장점이 있어 강교량의 적용이 점차 확대 적용되고 있다. 따라서, 프리플렉스 합성거더에도 경제성 등의 여러 가지 요인에 의하여 고강도강재의 적용이 사회적으로 요구되고 있다. 따라서, 이 장에서는 프리플렉스 합성거더에 고강도강재 적용 시 검토 사항에 대하여 기술하고자 한다.

3.1 고강도강재의 적용 현황

현재 국내의 프리플렉스 합성거더는 거의 대부분이 SM520 강재로 제작되고 있다. 고강도강재인 SM570 강재의 적용 실적이 없는 것으로 보고되고 있으나, 최근 1개 교량에 시험적으로 적용되어 시공 중에 있는 것으로 조사되었다. 그러나 일본의 경우는 비교적 건설 초기 단계부터 고강도강재의 적용이 검토되어 현재에는 지간 30m 이상의 교량에서는 Fig. 1과 같이 경제성을 고려하여 모든 프리플렉스 거더에 SM570 강재를 적용하고 있다³⁾. 또, 적용에 있어서도 설계단계에서 극후판

Table 3 국내에 시공된 프리플렉스 합성거더교의 시공 실적

지간	도로교 (비율)	철도교 (비율)	육교 (비율)	건축물 (비율)	도로교, 철도교 (비율)	도로교, 철도교, 육교 (비율)
0~20m	11 (2.26%)	19 (21.59%)	5 (10.87%)	30 (56.60%)	30 (5.23%)	35 (5.65%)
20~30m	142 (29.22%)	29 (32.95%)	17 (36.96%)	19 (35.85%)	171 (29.79%)	188 (30.32%)
30~40m	219 (45.06%)	39 (44.32%)	15 (32.61%)	3 (5.66%)	258 (44.95%)	273 (44.03%)
40~50m	114 (23.46%)	1 (1.14%)	9 (19.57%)	1 (1.89%)	115 (20.03%)	124 (20.00%)
계	486	88	46	53	574	620

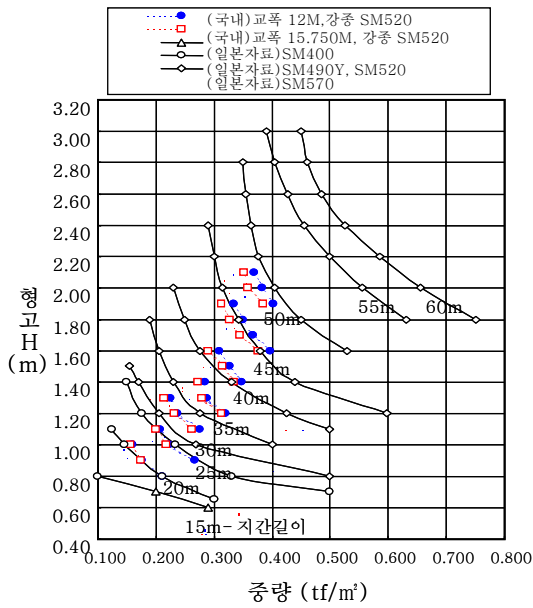


Fig. 1 강재 중량과 형고에 따른 프리플렉스 합성거더의 지간별 강재 종류별 적용 사례

강재 사용에 따른 항복응력 저감을 고려하여 일정항복응력강재인 SM570-H 강재를 사용하여 두께 증가에 의한 항복응력 저감을 고려하지 않도록 하고 있다.

Fig. 1에 일본의 지간별 강재 적용사례에 국내의 예를 SM520 강재를 대상으로 비교한 자료를 제시하였다. 지간이 30m 이하인 경우는 일본과 국내에 있어서 일반적으로 SM520 강재 등급을 적용하므로 그 차이가 나타나지 않으나 30m 이상에 있어서는 일본의 경우는 SM570-H 강재를 사용하므로 국내에 비해 강재량이 감소하여 고강도 강재의 효율성을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 다만 45m 이상에 있어서 이러한 경향이 나타나지 않는 것은 일본과 달리 국내의 경우 45m 이상이 되면 DB하중이 아닌 DL하중이 설계하중을 지배하는 요소가 되기 때문인 것으로 판단된다.

한편 고강도강재의 적용에 의해 프리플렉스 거더의 단면이 작아져서 콘크리트에 의한 크리프 및 건조수축에 의한 영향이 감소되므로 부가적인 효율성을 증대시킬 수 있다.

이하 고강도강재 사용시의 장점 및 현안 사항을 기술하면 다음과 같다.

- (1) 고강도강재를 사용하는 경우는 단면이 작아지므로 경제적인 뿐만 아니라 크리프 및 건조수축에 유리함.
- (2) 고강도강재 적용시 제작에 관한 기준은 도로교 설계기준/ 도로교 표준시방서의 제작기준을 따르면 문제가 없을 것으로 판단된다.
- (3) 고강도 강재 사용시 예열, 가공으로 인한 시간이

소요되므로 이에 대해서는 별도의 품셈기준을 적용하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

- (4) 현장 용접이 필요한 경우는 예열저감형 강재를 사용하는 것이 바람직하다.

3.2 고강도강재 적용에 따른 설계 시 유의사항

3.2.1 강재의 선택

프리플렉스거더의 고강도화를 위하여 도로교설계기준의 고강도강재인 SM570 강재를 사용한다. 또 향후 합리화 강교량의 특성을 고려하여 극후판 강재의 사용에 대응하기 위해서는 두께 증가에 따른 항복응력의 저감을 고려하여 일정항복응력을 갖는 고강도강재를 사용하는 것이 강재 중량을 저감시킬 수 있으므로 경제적인 측면에서 보다 효율적인 것으로 판단된다. 국내의 경우 SM570-TMC 강재가 이 강재에 해당한다.

3.2.2 피로 검토

국내의 표준적인 프리플렉스 합성거더에서 피로 검토 대상이 되는 이음상세 및 허용피로응력범위는 Table 5와 같다.

Table 5의 용접 이음상세 가운데 현재 국내의 피로 설계에서 고려하고 있는 일반적인 이음상세는 맞대기 이음과 종방향 용접 이음이 있으며, 그 이외의 구조상세에 대해서는 피로응력 범위 산출의 어려움, 국내시방에의 허용 피로응력 범위의 미제시 등의 이유로 인하여 피로검토가 이루어지고 있지 않다.

3.2.3 전단연결재

전단연결재는 프리플렉스 거더와 바닥판을 합성시켜 합성거더로 작용되도록 하는 역할을 한다. 현재 국내의

Table 5 피로 검토대상의 이음상세 및 허용피로응력범위

이음의 종류	허용피로응력범위		
	국내(kgf/cm ²)	AASHTO(kgf/cm ²)	JSSC(MPa)
맞대기이음	상세범주B(1120)	상세범주B(1120)	D등급(84)
종방향용접이음	상세범주B(1120)	상세범주B(1120)	D등급(84)
커버플레이트이음	상세범주E(160)	상세범주E(160)	G등급(32)
수직보강재	상세범주C(770)	상세범주C(770)	E등급(62)
전단연결재	상세범주C(770)	상세범주C(770)	E등급(62)

* 국내 및 AASHTO에 대해서는 단재경로에 200만회이상에 대한 허용피로응력범위

* JSSC에 대해서는 피로하한계응력범위

경우 프리플렉스 합성거더에는 일반적으로 스티드나 말굽형 형식의 전단연결재를 사용하고 있다. 그러나 말굽형 형식의 전단연결재는 강재거더에 대한 피로시험 결과, 피로강도가 말굽형의 구조상세 특성으로 인하여 스티드에 비하여 낮은 피로강도를 갖는 것으로 보고된 결과가 있으므로 가능한 사용하지 않는 것이 바람직 할 것으로 생각한다. 이 이외에 전단연결재의 향후 방향에 대해 기술하면 다음과 같다.

- (1) 제작의 합리화를 고려하여 하부플랜지의 전단연결재로 사용하는 스티드 대신 일본과 같이 직사각형 형상의 전단연결재를 사용하면 프리플렉스 거더 제작시 자동용접 시 효율적인 제작라인을 운영할 수 있으므로 제작의 합리화를 도모할 수 있을 것으로 생각한다. 또한 전단연결재로 최근 사용되기 시작한 구멍 뚫린 판 보강재 형태의 전단연결재의 사용을 고려하면 보다 시공의 합리화를 고려할 수 있을 것으로 생각한다.
- (2) 전단력의 계산에서는 전단력이 크게 작용하는 지점 부나 단락부 근처에 전단연결재를 조밀하게 배치하여 전단력의 전달이 충분히 되도록 고려한다.

3.3 고강도강재 적용에 따른 제작 시 유의사항

3.3.1 용접

프리플렉스 합성거더의 제작 시 가장 많은 이음을 차지하는 용접 이음부는 상·하 플랜지와 복부판을 연결하는 종방향용접이음의 필렛용접으로 프리플렉스 합성거더에서도 기존의 플레이트 거더의 제작 시 사용되는 SAW가 일반적으로 사용되고 있다. 이 SAW용접은 자동용접으로 비교적 입열량이 커서 일정 깊이의 용입을 확보할 수 있으며 용접 비드가 미려하게 되는 등의 특성이 있어 용접효율이 높은 용접이다. 또한, 자동용접이므로 용접이 일단 진행되면 아크가 안정되어 용접 중간부에 결함이 발생할 가능성은 매우 낮다. 따라서 용접결함은 일반적으로 아크가 불안정한 시기인 용접이 시작 때와 끝날 때 발생할 가능성이 높으므로 용접 시 종점부에 반드시 앤드 탭을 설치하고 용접을 실시하도록 한다. 고강도강재이므로 도로교표준시방서^{4,5)}의 예열규정을 준수하면서 품질관리를 실시하면 소정의 용접 품질을 확보할 수 있을 것으로 생각된다. 그러므로 강교량 제작기준에서의 고강도강재에 대한 예열 기준 규정을 각각 가불임 용접과 본 용접시에 적용하도록 한다.

3.3.2 프리플렉션 재하회수에 따른 잔류응력의 영향
고강도강재를 사용하면 일반강재에 비하여 강중이 감

소되므로, 즉 휨강성 EI가 감소되어 프리플렉션 하중 재하시 처짐증가의 개연성이 있어서 초기 잔류응력 등의 영향으로 인한 잔류처짐의 영향이 일반강재를 사용한 프리플렉스 합성거더보다 더 크게 나타날 수 있으므로, 소정의 프리플렉션 하중을 재하하여 잔류처짐에 의한 영향을 제거한 후, 프리플렉션에 의한 프리스트레스를 도입하는 것이 품질관리 측면에서 바람직 할 것으로 판단된다.

3.4 강교량 제작기준에서의 고강도강재에 대한 용접기준

고강도 강재의 용접에서는 용접부에 연화, 취화를 초래하지 않도록 입열량 및 층간온도 규정을 Table 6에 의하는 것으로 한다. 용접에 앞서서 용접에 의한 균열방지를 위해 강종, 용접법, 형상 및 재료의 판 두께에 따라 필요한 예열을 실시하여야 하는데, 본 용접의 최소 예열 온도는 Table 7을 표준으로 한다. 단, 시험 데이터 등에 의해 균열방지가 확실하게 보증되는 경우에는 충분히 관리된 예열을 전제로 하여 최소 예열 온도를 50℃까지 저감할 수 있는 것으로 한다. 또, 이 경우는 모재 및 용접 이음부에 대해서 필요한 기계적 성질, 인성, 용접부의 균열방지, 연화 등에 착목한 시험 데이터, 자료 등을 제출하고 감독원의 승낙을 받아야만 한다. 또, 예열의 최고온도는 Table 6의 입열량 및 층간온도에 나타난 층간온도이하로 한다.

예열방법은 1) 전기저항가열법, 고정버너, 수동버너 등에 의해 강종에 적합한 조건·방법을 선정한다. 2) 수동버너에 의한 경우는 최소가열시간 제한에 대해 검토하고, 작업요령에 기초하여 시공한다. 3) 버너로 예열하는 경우는 개선부를 직접 버너로 가열해서는 안된다. 4) 원칙적으로 대칭 예열로 하고 국부에만 집중하여 실시하지 않는다. 5) 예열범위는 용접선 양측 100mm 및 아크전방 약 100mm를 최소범위로 하고, 6) 예열온도 측정은 표면온도계 또는 온도 초크를 사용

Table 6 조결고강도강재의 입열량 및 열간 온도의 제한

강종	판두께	최대입열량 Q(KJ/cm)	최대층간온도 T(℃)
SM570 SMA570	t<25	Q≤50	T≤230
	25≤t<50	Q≤70	T≤230
	50≤t<75	Q≤80	T≤230
HT690 HT780	t<25	Q≤40	T≤200
	25≤t<50	Q≤50	T≤200
	50≤t<75	Q≤50	T≤230

Table 7 예열온도의 표준(°C)

관두께 강종	t<25	25≤t<38	38≤t<50	50≤t≤100
SS 400 SM 400	예열없음	예열없음 40~60 ^{*1}	40~60	110
SM 490, SMA 41	예열없음	40~60	80~100	110
SM 490Y, SM520 SM 570, SMA 50 SMA 58	40~60	80~100	80~100	110

주 : 1) 저수소계의 용접봉 사용을 표준으로 함
 2) *1은 저수소계 이외의 용접봉을 사용할 때
 3) 최근에는 고성능 강재의 개발로 인하여 SM690, SM780의 경우에도 예열온도를 50°C까지 저하시켜 작업성을 향상시키고 있다.

하여 양측 약 50mm의 위치에서 실시한다. 7) 용접선의 양측 10cm 및 아크 전방 10cm의 범위내의 모재를 Table 7의 표준에 따라 예열 하여야 한다. 다만, 특별한 실험자료에 의하여 균열방지가 확실히 보증될 수 있거나 강재의 용접균열 감수성 지수, Pcm이 Table 8을 만족할 경우는 강종, 강관두께 및 용접방법에 따라 Table 7의 값을 조정할 수 있다.

(가) 강재의 밀시트에서 다음 식에 따라서 계산한 탄소당량이 0.44%를 초과 할 때

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \left(\frac{Cu}{13}\right)(\%)$$

Table 8 예열온도를 조정할 경우의 Pcm 조건

강재두께	SM 400	SMA 41	SM 400 SM 490Y	SM 520 SM 570	SMA 50 SMA 58
t≤25	0.24이하	0.24이하	0.26이하	0.26이하	0.26이하
25<t≤50	0.24이하	0.24이하	0.26이하	0.27이하	0.27이하
50<t≤100	0.24이하	-	0.27이하	0.29이하	-

주 : 1) Pcm 산정식

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B(\%)$$

2) 예열온도 산정식

$$T_p(°C) = 1,440 P_w - 392$$

$$P_w = P_{cm} + \frac{H_{GL}}{60} + \frac{K}{40,000}$$

식중에서 H_{GL} : 용접금속의 확산성수소량, K : 용접이음부의 구속도

단, ()항은 Cu≥0.5일때에 더하는 것으로 한다.

(나) 경도시험에 있어서 예열하지 않고 최고 경도(Hv)가 370을 초과 할 때

(다) 기온(실내일 때에는 실온)이 5°C이하일 때

4. 고강도강의 용접잔류응력 거동

4.1 프리플렉스거더의 품질에 미치는 용접잔류응력의 영향

고강도강을 이용한 프리플렉스거더 제작은 프리플렉스거더의 사용하중에 따른 강도의 확보측면에서 기존의 프리플렉스거더에 비하여 유리하기 때문에 재료의 절감 및 제작 원가의 절감 측면에서 우수한 장점을 지니고 있다. 또한, 프리플렉스거더는 열간압연된 판재의 복부와 상, 하부플랜지를 대입열의 용접을 수회에 걸쳐 수행하여 접합, 제작하게 되므로 빔의 내부에는 항상 잔류응력이 발생되어 부재 전체에 걸쳐 잔존하게 된다. 프리플렉스거더의 설계과정에서 의도한 소정의 계획된 초기응력을 강재의 빔에 유발하기 위해서는 용접에 의해 부재내에 발생된 용접잔류응력의 강도와 분포양상의 평가뿐만 아니라 그 잔류응력을 효과적으로 제거하는 것이 제품에 대한 신뢰성 및 안전성을 확보하는데 있어서 핵심요소가 된다.

프리플렉스거더의 실제 현장 시공과정과 시공 후의 결과를 보면 상당수의 프리플렉스거더의 콘크리트 케이싱부에 균열이 발생하고 있어 제품의 품질뿐만 아니라 내구강도와 안전성에도 문제가 제기되고 있으며, 이의 원인으로서는 강재의 생산과정에서 재료의 불균일, 열간압연과 절단에 의한 잔류응력내재, 현장 시공과정에서 부정확한 프리플렉션하중 도입과 릴리즈, 캠버의 오차, 크리프 발생, 빔의 제작과정에서 발생하는 용접잔류응력의 발생 등이 있다.

이러한 인자들의 영향으로 설계단계에서 의도된 압축응력이 시공과정에서 정확히 발생되지 못하고 압축응력의 일부가 상실됨으로 제품이 외부하중에 대하여 비선형-소성거동을 하게 되고 시공 후에 최초 설계 및 해석과정과는 다른 거동을 하는 프리플렉스거더가 상당수 발생하므로 이를 방지하기 위해 빔의 제작과정 중에 품질에 영향을 미치는 인자들 중 가장 지배적으로 영향을 미치는 용접잔류응력의 영향에 대해 초점을 맞추어 용접잔류응력이 빔제작에 미치는 영향과 이러한 잔류응력을 보다 효과적으로 제거하기 위한 프리플렉션하중의 재하조건 선정에 대해 규명할 필요가 있다.



Fig. 2 1000톤 인장시험기를 이용한 고강도강 프리플렉스거더 시험체 재하실험 전경

따라서, 본 장에서는 고강도강 프리플렉스거더를 제작, 실용화하기 위하여 프리플렉스거더 제작과정에서 불균일한 프리플렉션하중을 발생하게 하는 가장 중요한 원인이 되고 있는 용접에 의해 유발되는 잔류응력과 관련하여 고강도강 프리플렉스거더의 현장 제작 조건과 동일한 용접조건으로 실험용 실물 시편을 Fig. 2와 같이 제작하여 1000톤 인장시험기를 이용한 잔류응력 거동에 대한 해석 및 실험을 실시하였으며 그 결과를 간단히 소개하고자 한다.

4.2 용접 열분포 및 열응력 해석방법

유한요소해석 프로그램을 이용하여 용접 열분포 및 열응력 해석을 수행하였다^{6,7)}. Fig. 3은 해석에서 사용한 요소의 분할 및 시험편의 크기와 형상을 보여주고 있으며, 시험편의 크기 및 형상은 하중시험을 고려하여 상·하 플렌지와 복부의 두께는 30mm, 폭과 높이는 430mm로 선정하였으며, 수치해석을 위한 요소의 분할에서는 총 절점수는 2,113개, 총 요소수는 1,920개로 하였다. 그리고, 용접조건은 철골제작 현장의 서브머지

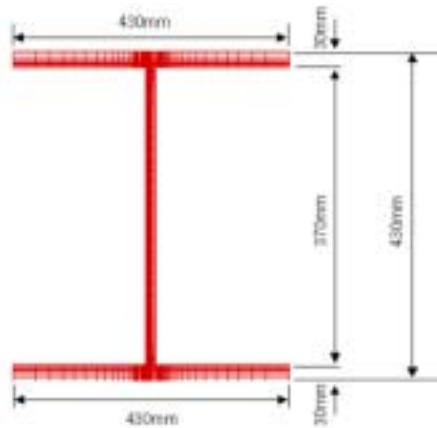


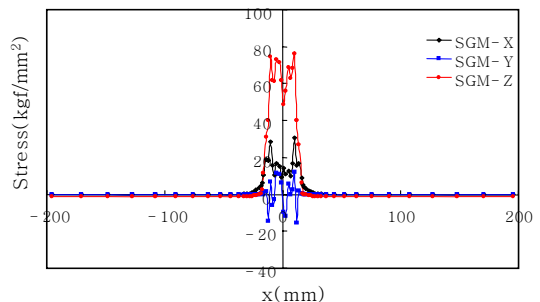
Fig. 3 해석 시험편의 크기 및 요소분할

드 아크용접(SAW) 기준으로 전류 620A, 전압 33V, 용접속도는 각장에 따라 70cm/min (각장12mm), 용접효율은 0.9 로 하였으며 예열온도는 50℃ 와 100℃ 의 조건으로 하였다.

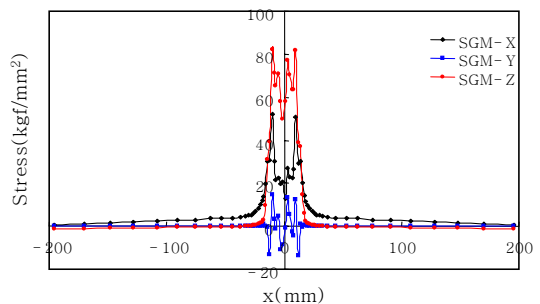
4.3 용접 열응력 해석 결과 및 분석

열분포 특성 및 열이력 특성을 입력 데이터로 고강도강(SM570) 프리플렉스거더에 대하여 열탄소성 수치해석을 수행하여 용접 열응력 분포 특성과 경향을 파악한다. Fig. 4는 예열을 하지 않은 경우 용접잔류응력을 각 성분별로 나타낸 것으로써 상·하 플렌지를 기준으로 용접이 수행되는 표면으로부터 1mm 떨어진 지점에서 폭방향으로 분포하는 용접잔류응력 성분들이다. 그림 중 (a)는 상부 플렌지에 잔류하는 응력성분이고, (b)는 하부 플렌지에 잔류하는 응력성분들이다. 그림에서 SGM-X는 용접선 직각 방향 응력성분이고, SGM-Y는 두께방향 응력성분이며, SGM-Z는 용접선 길이방향응력성분을 각각 나타내고 있다.

먼저 응력의 각성분들을 비교하여 보면, 상·하 플렌지 모두 용접선 길이방향응력인 SGM-Z가 용접부에서 근처에서 가장 큰 인장응력을 나타내고, 다음은 용접선 직각방향응력 응력인 SGM-X의 인장응력성분이 크게 나타나고 있으며 두께방향의 응력인 SGM-Y는 상대적으로 가장 작은 응력을 나타내고 있다. 이러한 원인은



(a) 상부 플렌지의 용접잔류응력 분포



(b) 하부 플렌지의 용접잔류응력 분포

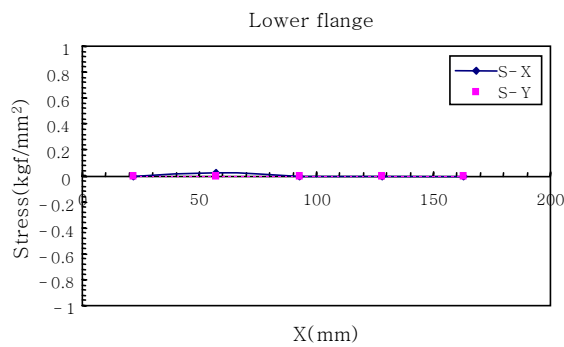
Fig. 4 상·하 플렌지의 용접잔류응력 분포 특성

프리플렉스거더의 크기와 형상에 따른 강성의 차이에 기인하는 결과라 판단된다.

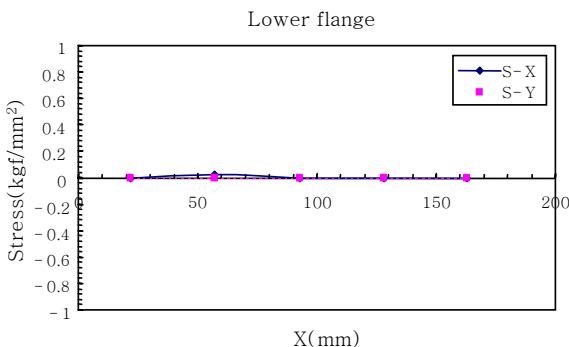
다음으로 상부 플랜지와 하부 플랜지에 잔류하는 응력을 비교하여 보면, 그 차이는 크지 않지만 상부 플랜지 보다 하부 플랜지에서 보다 큰 잔류응력이 나타나고 있는데 이것은 수치해석시 적용한 모델의 구속조건이 하부 플랜지쪽에 있기 때문인 것으로 판단된다, 왜냐면 전절의 열분포 및 열이력 특성에서 빔의 상부와 하부가 거의 동일한 결과를 나타내고 있기 때문에 열 특성에 원인을 둔 현상으로 보기 어렵기 때문이다.

기존의 SM490재 프리플렉스거더와과 비교하여 고강도강 프리플렉스거더에서 인장 응력이 높게 나타나고 있는데 이것은 고강도강이 항복강도 및 극한 강도가 상대적으로 높기 때문으로 생각된다.

Fig. 5(a)는 하부플랜지에 대한 재하후 절단법에 의한 잔류응력 계측 결과로서 S-X 는 용접선 길이 방향의 응력이고 S-Y 는 폭 방향의 응력을 나타내고 있다. 용접선 길이 방향응력 및 폭 방향의 잔류응력 모두 거의 제거되었음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 상부플랜지에 대한 잔류응력 계측결과를 상부와 동일한 방식으로 나타낸 것으로서 역시 길이 방향 응력 및 폭 방향 응력 모두 0에 가깝게 나타나고 있어 프리플렉스 하중으로 인하여 용접잔류응력이 제거되었음을 잘 보여주고 있다.



(a) 하부플랜지 잔류응력 분포



(b) 상부플랜지 잔류응력 분포

Fig. 5 재하 후 프리플렉스 상하부 플랜지 잔류응력 분포

고강도강 프리플렉스거더와 기존 SM490 프리플렉스거더의 재하후 최종적으로 잔류하는 응력들을 비교하여 보면 기존 거더의 경우 보다 고강도강거더의 경우가 응력제거 및 완화 정도가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 고강도강(SM570) 프리플렉스거더를 제작하고 실용화하기 위하여, 국내·외의 기준을 조사하여 설계 및 제작 방법에 대해 검토하고, 이를 토대로 프리플렉스 합성거더에 관한 기준을 정립하고자 하였으며 고강도강 적용 시 거더의 용접잔류응력 특성을 규명하여 고강도강의 프리플렉스거더에 대한 그 적용가능성을 검토하였으며 중요한 결과를 아래에 요약하였다.

먼저, 프리플렉스 합성거더에 고강도강재 적용을 위한 시방기준에 대한 조사를 통하여 고강도강재 적용시 유의할 사항을 정리하고 이를 설계개념과 제작에서의 유의사항에 반영하도록 하였다. 설계에서는 향후 합리화 프리플렉스 합성거더에의 극후판 사용을 위해 일정 항복응력을 갖는 강재의 적용 등이 효율성이 높을 것으로 판단되었으며, 제작에서는 고강도강재의 특성을 유지하기 위한 예열관리 등에 주의하면서 도로교 표준시방서의 제작기준에 준하여 품질관리를 하면 충분히 제작성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

SM570 고강도강재 거더의 용접 열분포 및 잔류응력 분포 경향은 SM490 거더의 경우와 유사한 경향을 보이고 있으나, 용접조건 및 강재 물성치의 차이로 인하여 고강도강재 빔의 경우에서 용접잔류응력성분이 보다 크게 생성되었다. 그러나 동일한 하중재하 조건을 적용한 저강도(SM490)프리플렉스거더의 경우와 비교하여 보면 고강도강(SM570) 프리플렉스거더에서 더욱 효과적으로 용접잔류응력이 제거되었음을 알 수 있었다. 이상의 결과로부터 기존의 SM490 프리플렉스거더에 비하여 강도 및 재료절감 측면에서 우수한 고강도강 프리플렉스거더가 보다 유리할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 대한토목학회 : 프리플렉스 합성형 표준시방서 및 동해설(안), 사단법인 대한토목학회, 1986
2. 대한토목학회 : 프리플렉스 합성형교의 설계제작 및 시공지서, 사단법인 대한토목학회, 1986
3. プレブィム振興會 : プレブィム合成けた橋設計・製作・施工要領書, 1999.3
4. 한국도로교통협회 : 도로교 설계기준, 사단법인 한국도로교통협회, 2000

5. 한국도로교통협회 : 도로교 설계기준·해설, 사단법인 한국도로교통협회, 2003
6. 방한서: 有限要素法에 의한 薄板熔接의 2次元非定常熱傳導解

析, 大韓造船學會誌, 27-4(1990) 44-50

7. 방한서: 후판용접부의 역학적 특성, 대한용접학회지, 10-4(1992) 250-258



- 장응성(張雄成)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 경갑수(慶甲秀)
- 1962년생
- 한국해양대학교, 토목환경시스템공학부
- 교량공학, 강구조물 피로파괴
- e-mail : kyunks@hhu.ac.kr



- 방한서(房漢瑞)
- 1951년생
- 조선대학교 항공 조선공학부
- 용접역학 및 공정
- e-mail: hsbang@mail.chosun.ac.kr