

다단계 온도프리스트레싱을 이용한 강거더교의 보강에 관한 연구

A Study on Strengthening of Steel Girder Bridge using Multi-Stepwise Thermal Prestressing Method

김 상 호¹⁾ · 김 준 환²⁾ · 안 진 희^{3),†}
Kim, Sang Hyo · Kim, Jun Hwan · Ahn, Jin Hee

요 약 : 교량의 보강공법으로 주로 사용되는 외부강봉을 이용한 후인장공법은 적용범위가 넓고 교량의 극한 및 항복에 대한 강성을 증가시켜 휨 보강 효과가 뛰어나지만, 모재접합부의 응력집중, 비효율적인 하중분배, 고정앵커부설치, 유지관리의 어려움 등의 단점이 있다. 본 연구는 기존의 외부강봉을 이용한 후인장공법이 가지는 단점을 보완하고 강관접합공법의 장점을 접목한 새로운 개념의 보강공법으로 커버플레이트의 열변형 특성을 이용한 다단계 프리스트레싱 보강공법을 제안하고자 한다. 커버플레이트의 열변형 특성을 이용한 다단계 프리스트레싱 보강공법은 커버플레이트를 다단계로 가열하여 가열단계별로 거더의 하부플랜지에 고장력볼트로 접합한 뒤, 열원을 제거하여 발생하는 다단계 수축력을 보강에 필요한 프리스트레싱력으로 이용하는 보강공법이다. 커버플레이트의 다단계 프리스트레싱에 의한 보강효과는 커버플레이트의 온도분포와 가열구간에 따라 결정되므로 본 연구에서는 커버플레이트의 열전달 모형실험 및 강거더 모형 실험을 통하여 커버플레이트의 열전달해석과 프리스트레싱 도입효과를 분석하였으며, 단경간 강거더 교량을 대상으로 제안된 보강공법의 효율성 및 적용성을 검토하였다.

ABSTRACT : Traditional external post-tensioning method using either steel bars or tendons is commonly used as a retrofitting method for steel composite bridges. However, the method has some disadvantages such as stress concentration at anchorages and inefficient load-carrying capability of live loads. Multi-stepwise prestressing method using thermal expanded coverplate is a newly proposed prestressing method, which was originally developed for prestressing steel structures. A new retrofitting method for steel girder bridges founded on a simple concept of thermal expansion and contraction of cover plate, the method is a hybrid of and combines the advantages of external post-tensioning and thermal prestressing. In this paper, basic concepts of the method are presented and an illustrative experiment is introduced. From actual experimental data, the thermal prestressing effect was substantiated and the FEM approach for its analysis was verified. The retrofitting effects of a single-span bridge were analyzed and the feasibility of the developed method was examined.

핵 심 용 어 : 열응력, 다단계 프리스트레싱, 온도분포, 강거더교, 보강

KEYWORDS : thermal stress, multi-stepwise prestressing, temperature distribution, steel-plate girder bridges, strengthening

1. 서론

교량의 내하성능 저하는 공용기간의 증가와 환경오염 등에 따른 교량의 손상에 의하여 주로 발생하며, 차량하중의 증량화와 교통량의 증가도 상대적으로 교량의 내하성능을 저하시키는 원인이 된다. 교량의 내하성능이 저하된 경우, 교량의 신설이나 보수·보강을 통하여 교량의 내하성능을 향상시킬 수 있다.

하지만 교량의 신설은 시공비용이나 공사기간과 같은 직접적인 문제와 공사기간동안 주변의 교통체증과 같은 사회적 문제를 유발하게 되므로, 보수·보강을 통하여 교량의 내하성능을 향상시킬 수 있는 경우 적절한 보강공법을 이용하여 교량의 내하성능을 향상시키는 것이 합리적일 수 있다. 현재 국내에서 사용되고 있는 교량의 주요 보강공법으로는 외부강봉을 이용한 후인장공법, 강관이나 탄소섬유 등을 교량하부에 직접 부착하

1) 정희원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사(sanghyo@yonsei.ac.kr)
2) 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정(junnani@yonsei.ac.kr)
3) 교신저자, 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
(Tel. 02-2123-2804, Fax. 02-364-5300, E-mail : palanorange@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

는 단면부착공법, 교각증설공법 등이 있다(박용결 등, 2000). 외부강봉을 이용한 보강공법은 적용범위가 넓고, 교량의 극한 및 항복에 대한 강성을 증가시키므로 휨 보강 효과가 뛰어나지만(Shiming 등, 2005; Wojciech 등, 2006), 모재와 강봉 접합부의 응력집중, 보강 후 작용하중에 대한 비효율적인 하중 분배, 앵커부설치의 어려움 등이 단점으로 알려져 있다. 또한 강관부착공법은 거더 하부에 강관을 부착하여 단순히 단면만을 증대시킨 것으로 공정이 단순하고 경제적이거나, 후인장공법과 비교하여 상대적으로 보강효과가 떨어지고 기존 구조물과 일체 거동 여부의 문제가 발생할 수 있으며, 교각증설공법은 추가적으로 발생하는 부모멘트부의 처리가 용이하지 않다(박용결 등, 2000).

본 연구는 후인장공법과 단면부착공법의 장점을 고려한 새로운 보강공법으로 커버플레이트의 다단계 온도변형 특성을 이용한 다단계 온도프리스트레싱 보강공법을 제안하고자 한다. 커버플레이트의 온도변형 특성을 이용한 다단계 온도프리스트레싱 보강공법은 일시적인 열원에 의하여 팽창이 유도된 커버플레이트를 교량에 강결한 후 열원을 제거함으로써 발생하는 커버플레이트의 수축력을 거더의 보강에 필요한 프리스트레싱으로 도입하는 공법으로, 커버플레이트의 온도분포와 가열구간에 따라 프리스트레싱력이 다단계로 결정되므로 보강수준에 따른 효율적인 프리스트레싱력의 도입과 정착부의 응력집중 문제를 감소시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 다단계 온도프리스트레싱 보강공법의 실효성 검증을 위하여 응력도입 모형실험과 열전달 실험을 실시하고 단경간 강거더교를 대상으로 제안된 프리스트레싱 보강공법의 보강효과를 분석하였다.

2. 커버플레이트의 온도변형을 이용한 다단계 온도프리스트레싱 보강공법

커버플레이트의 온도변형을 이용한 다단계 온도프리스트레싱(이하 온도프리스트레싱) 보강공법은 그림 1(a)와 같이 인덕션히터 가열판이나 실리콘러버 가열판 등 에너지 효율이 우수한 전기가열판을 이용하여 프리스트레싱 도입정도에 따라 커버플레이트를 다단계 가열하고, 그림 1(b)와 같이 교장력 볼트를 이용하여 커버플레이트와 거더를 강결 시킨 후 가열판의 가열을 중지 하였을때 발생하는 그림 1(c)와 같은 다단계 수축력을 교량의 보강에 필요한 프리스트레싱력으로 도입하는 공법이다. 그림 1은 커버플레이트의 다단계 온도변형을 이용한 다단계 프리스트레싱 보강공법의 시공절차로 ΔT 는 보강수준에 따라 커버플레이트에 도입되는 거더와의 상대 온도차이며, P 는 강관의 수축에 의하여 도입되는 다단계 프리스트레싱력이다.

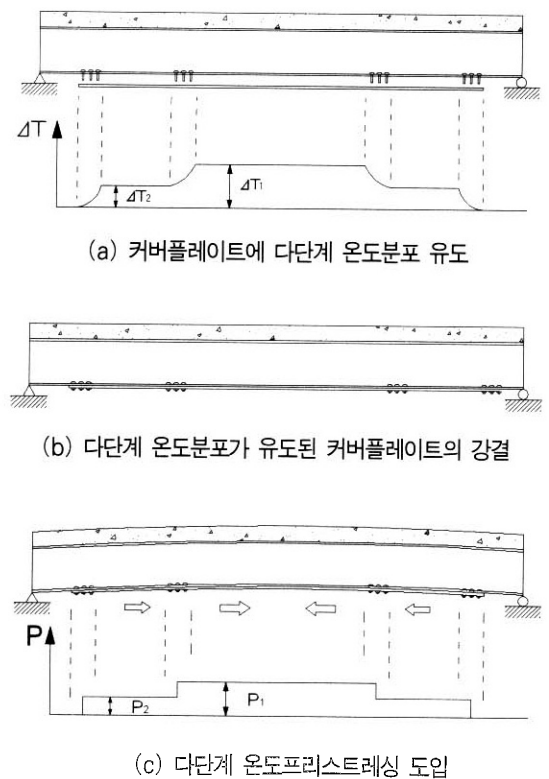


그림 1. 다단계 온도프리스트레싱 보강공법의 시공절차

다단계 온도프리스트레싱 보강공법의 보강효과는 다단계 온도변형이 도입된 커버플레이트의 냉각에 의하여 발생한 압축력에 의한 프리스트레싱과 커버플레이트의 부착에 따른 교량의 단면 증가이다. 커버플레이트의 냉각에 따른 압축력은 그림 2와 같이 교량에 편심하중으로 작용하여 교량의 하부플랜지에는 설계하중에 의하여 발생하는 인장응력을 감소시키는 압축응력을 도입시키고, 상부 바닥판에는 설계하중에 의한 압축응력을 감소시키는 인장응력을 도입하게 된다.

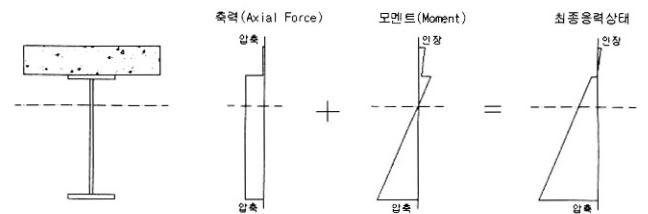


그림 2. 편심축하중에 의한 강거더교의 응력분포

온도프리스트레싱에 의하여 거더에 도입되는 프리스트레싱력은 커버플레이트의 가열에 의한 자유팽창량과 가열된 커버플레이트를 구속시킨 후 발생하는 커버플레이트의 최종 수축량에 대하여 평형방정식과 적합방정식 및 변위관계식을 이용하여 식 (1)과 같이 계산 할 수 있으며, 식 (2a)와 식 (2b)는 온도프리스트레싱에 의하여 도입된 강거더 하연과 콘크리트 바닥판

상연의 프리스트레싱이다.

$$P = \frac{\alpha (T_F - T_\infty) E A_P A_G I_G}{A_G I_G + A_P I_G + A_P A_G e y} \quad (1)$$

$$\sigma_s = \frac{P}{A_G} - \frac{P e}{I_G} y \quad (2a)$$

$$\sigma_c = \frac{P}{n A_G} + \frac{P e}{n I_G} (H - y) \quad (2b)$$

여기서, T_F 는 커버플레이트의 도입온도, P_F 는 커버플레이트의 온도하강에 의한 수축력, E 는 탄성계수, A_P 는 커버플레이트의 단면적, A_G 는 거더의 단면적, I_G 는 거더의 단면 2차모멘트, e 는 프리스트레싱 편심축하중의 편심거리, H 는 강거더교의 높이, y 는 강거더교의 중립축에서 거더 하연까지의 거리이다.

그림 3은 다단계 온도프리스트레싱에 의하여 강거더교에 도입된 보강효과로 곡선 (a)는 거더에 작용하는 설계 휨모멘트에 의해서 하부플랜지에 작용하는 응력이며, 곡선 (b)는 다단계 프리스트레싱이 도입된 하부플랜지의 작용응력, 곡선 (c)는 응력도입구간 내에서의 단면증가로 발생하는 추가적인 인장응력의 감소로 발생하는 하부플랜지의 최종응력 곡선이다. 따라서 다단계 온도프리스트레싱 보강공법에 의한 프리스트레싱력과 단면보강으로 하부플랜지의 작용응력을 보강구간에서 일정한 수준으로 감소시켜 효율적인 보강효과가 도입될 수 있음을 알 수 있다.

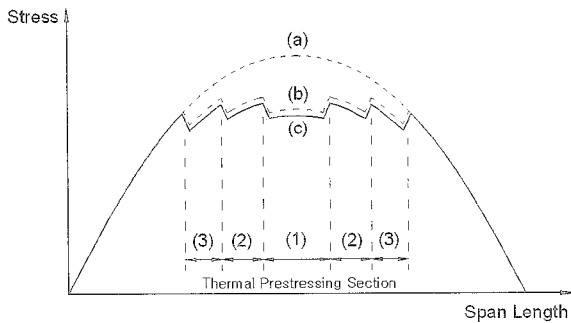


그림 3. 단경간 강거더교 하부 플랜지의 응력감소

3. 커버플레이트의 열전달 실험

다단계 온도프리스트레싱은 커버플레이트에 유도된 다단계 온도분포에 의하여 도입응력과 커버플레이트의 설계가 결정되므로 정확한 온도분포의 해석은 다단계 프리스트레싱 효과의

해석에 있어 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 김상호(2006)등이 제안한 커버플레이트의 다단계 온도분포 열전달 이론식을 모형 실험을 통하여 검증하였다.

3.1 커버플레이트의 열전달 이론해

커버플레이트의 열변형에 의하여 도입되는 프리스트레싱력은 커버플레이트의 열팽창 및 수축 특성에 의하여 결정된다. 커버플레이트는 그림 4와 같이 가열판이 설치되는 가열구간과 가열구간과 거더와 커버플레이트의 접합을 위한 고장력 볼트의 체결구간으로 구분되며, 커버플레이트의 다단계 온도분포 이론해는 커버플레이트를 직접가열하는 구간과 직접적인 가열이 없이 가열구간의 열전달에 의하여 비선형 온도분포를 가지는 고장력 볼트체결구간의 온도분포에 의하여 결정된다. 비선형 온도분포를 가지는 고장력 볼트체결구간의 온도분포식은 김상호(2006)등이 열역학 제1법칙인 에너지보존법칙에 따라 2차 미분방정식으로부터 유도하였으며, 내측 고장력 볼트체결구간과 외측 고장력 볼트체결구간의 비선형 온도분포는 식 (3), 식 (4)와 같다.

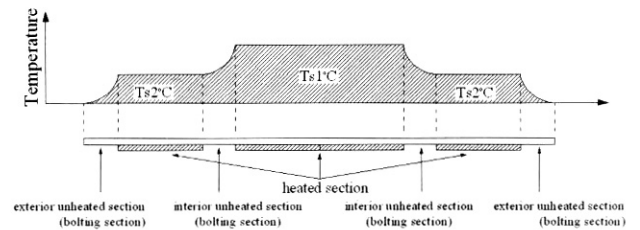


그림 4. 커버플레이트의 열전달 조건

$$T(x) = (T_{s_1} - T_\infty) \left[\cosh(mx) - \frac{\cosh(mL_1)}{\sinh(mL_1)} \sinh(mx) \right] + (T_{s_2} - T_\infty) \frac{\sinh(mx)}{\sinh(mL_1)} + T_\infty \quad (3)$$

$$T(x) = (T_{s_2} - T_\infty) \times \left[\cosh m(L_2 - x) + \frac{h_c}{mk} \sinh m(L_2 - x) \right] / \left[\cosh(mL_2) + \frac{h_c}{mk} \sinh(mL_2) \right] + T_\infty \quad (4)$$

여기서, $m^2 = h_c p / k A_w$, h_c 는 대류열전달계수 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), k 는 열전도도 ($W/m \cdot ^\circ C$), A_w 는 커버플레이트의 단면적, p 는 커버플레이트의 윗변장, T_s 는 커버플레이트의 가열온도 ($^\circ C$), T_∞ 는 대기온도 ($^\circ C$)이다.

3.2 커버플레이트의 열전달 모형실험

제안된 커버플레이트의 온도분포 이론해의 검증을 위하여 그림 5와 같이 폭 300mm, 두께 15mm의 강판을 이용하여 총 6회의 열전달 실험을 실시하였으며, 이론해 및 실험결과와의 비교를 위하여 유한요소해석을 병행하였다. 커버플레이트의 열전달 실험을 위하여 가열구간1과 가열구간2에 도입된 다단계 온도분포는 표 1과 같다. 커버플레이트의 가열은 실리콘러버 가열판과 온도조절기를 이용하였으며, thermocouple과 data logger(LabVIEW)를 이용하여 열전달구간의 온도분포를 측정하였다. 그림 6은 열전달 실험을 위한 Thermocouple 부착 위치이며, 그림 7은 열전달 실험에 사용된 장비의 배치이다.

커버플레이트의 열전달 유한요소해석은 유한요소해석 프로그램인 LUSAS를 사용하여 모형화 하였다. 커버플레이트는 2차원 평면요소(plane-field)로 모형화 하였으며, 대기온도는 20 °C, 대류열전달계수는 $0.0000035 W/mm^2 \cdot ^\circ C$, 강판의 열전도는 $0.06 W/mm \cdot ^\circ C$ 로 가정하였다.

표 1. 열전달 해석을 위한 커버플레이트의 가열온도

	실험1	실험2	실험3	실험4	실험5	실험6
가열구간1	80°C	80°C	70°C	70°C	70°C	70°C
가열구간2	60°C	60°C	55°C	60°C	65°C	60°C

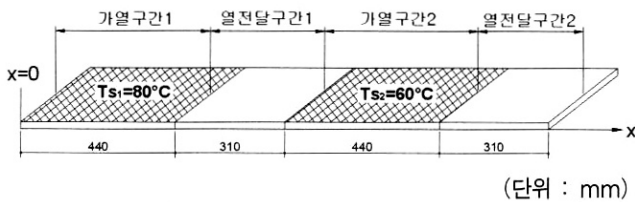


그림 5. 열전달 모형실험 커버플레이트

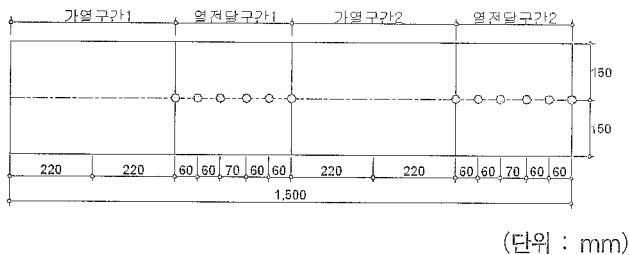


그림 6. 온도분포 측정을 위한 thermocouple 부착위치

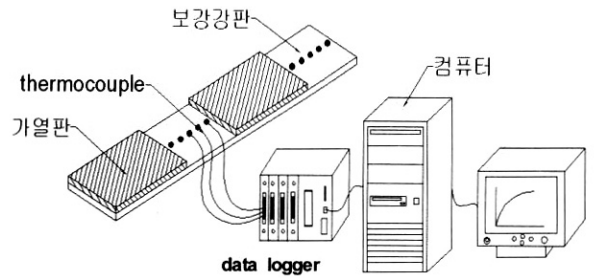


그림 7. 열전달 실험장비의 배치

가열구간1과 가열구간2에 80°C와 60°C의 다단계 온도분포를 도입한 경우 열전달구간1과 열전달구간2의 온도분포는 시간에 따라 그림 8, 그림 9와 같이 나타났다. 커버플레이트의 열평형 도달시간은 약 4시간이 소요되었으며, 가열 종료 후 커버플레이트의 냉각에도 약 4시간이 소요되었다. 커버플레이트의 열평형 도달시간이 4시간 정도 소요된 것은 용량이 적은 실리콘러버 가열판을 사용하였기 때문이며, 현재 개발이 완료된 전자기 유도에 의한 가열판인 인덕션 가열판을 사용할 경우 열평형 도달시간을 30분 내외로 단축할 수 있다.

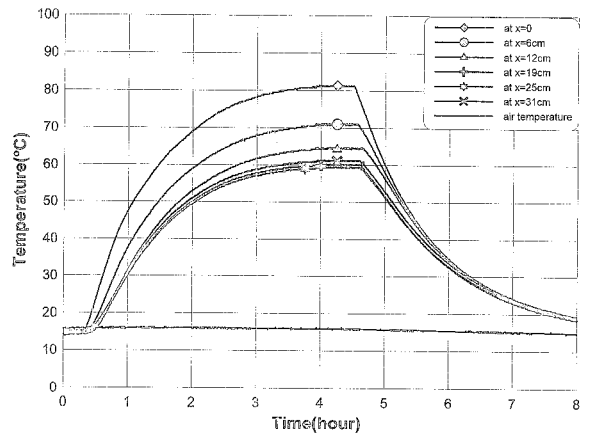


그림 8. 시간에 따른 열전달구간 1의 온도변화(실험1 80°C)

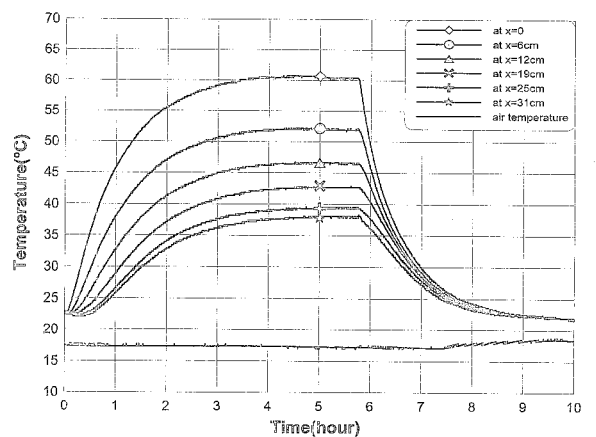
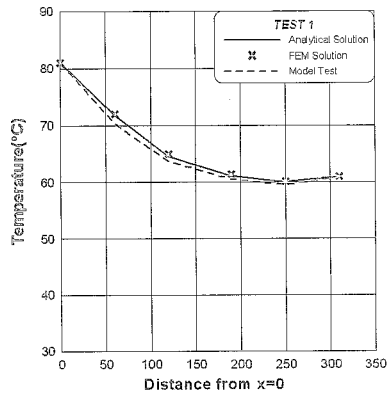
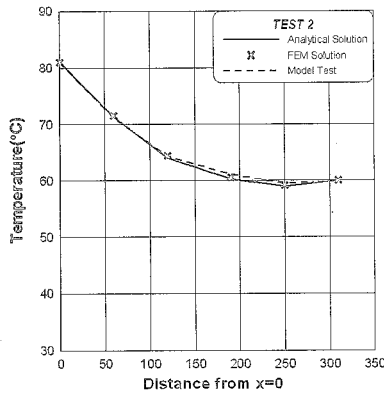


그림 9. 시간에 따른 열전달구간 2의 온도변화(실험1 60°C)

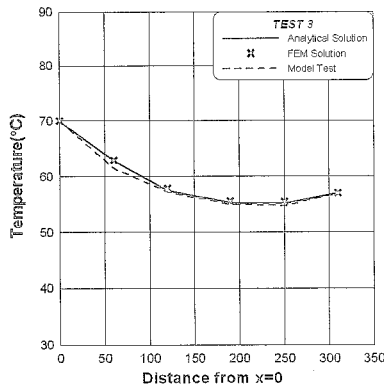
그림 10은 식 (3)과 (4)의 온도분포 이론해와 유한요소해석의 결과를 모형실험결과와 비교한 것으로, 그림 10(a)~10(c)는 열전달구간1에서의 온도분포이며, 그림10(d)~10(f)는 열전달구간2에서의 온도분포이다. 열전달구간에서 측정한 온도분포가 이론해 및 유한요소해석 결과와 매우 잘 일치하고 있으므로 커버플레이트의 설계 및 해석에 본 연구에서 제안한 열전달 이론식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.



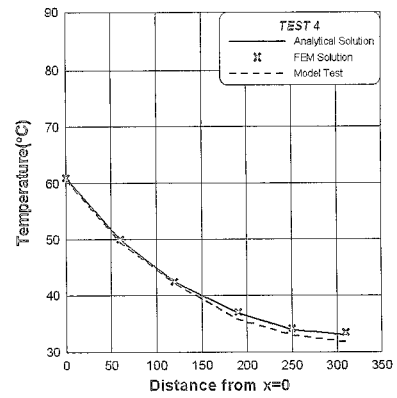
(a) 실험1의 열전달구간1



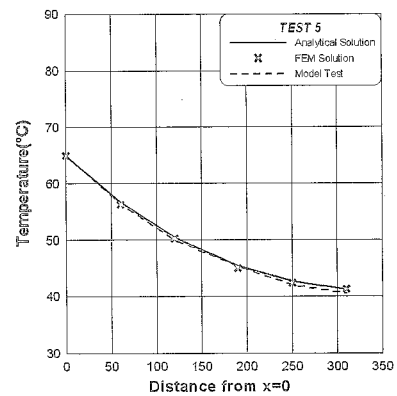
(b) 실험2의 열전달구간1



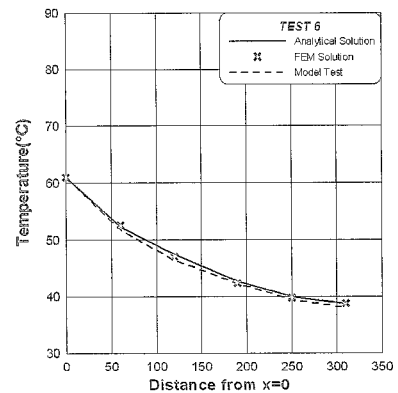
(c) 실험3의 열전달구간1



(d) 실험4의 열전달구간2



(e) 실험5의 열전달구간2



(f) 실험6의 열전달구간2

그림 10. 열전달 모형실험 결과

4. 다단계 온도프리스트레싱 모형실험

4.1 실험 개요

본 연구에서 제안한 다단계 온도프리스트레싱 보강공법을 실험적으로 검증하기 위하여 폭 30cm, 높이 30cm의 H형강(SS400)을 이용하여 다단계 온도프리스트레싱 모형실험을 실시하였다. 프리스트레싱 도입을 위한 커버플레이트는 폭

30cm, 두께 1.5cm의 강판(SS400)을 사용하였으며, 가열기구로는 실리콘러버 가열판과 온도조절기를 사용하였다. 다단계 온도분포가 도입된 커버플레이트와 H형강의 체결은 고장력볼트(F10T, M22)를 사용하였다. H형강에 도입되는 프리스트레싱력과 변위의 확인을 위하여 그림 11과 같이 모형시편의 상부 플랜지와 하부플랜지에 변형률게이지를 부착하였으며, 프리스트레싱 도입구간 중앙부와 외측에 변위계를 설치하고 Data logger(TDS-601)를 이용하여 측정하였다. 커버플레이트의 도입온도의 측정은 thermocouple과 data logger(LabVIEW)를 이용하였으며, 유한요소해석과 실험결과를 비교하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 H형강을 모형화 하였다.

다단계 온도프리스트레싱 도입은 표 2와 같이 다단계 온도분포를 변화시켜 총 3회 실시하였으며, 커버플레이트는 실험상의 편의를 고려하여 H형강의 상부에 설치하여 온도프리스트레싱에 의한 응력도입을 확인하였다. 그림 12는 온도프리스트레싱 도입을 위한 실험장비의 배치이며, 그림 13은 커버플레이트에 다단계 온도분포를 도입한 후 고장력 볼트를 이용하여 H형강과 커버플레이트를 체결하는 모습이다.

표 2. 다단계 커버플레이트 도입온도

	실험1	실험2	실험3
가열구간1(목표온도)	50℃	40℃	55℃
가열구간2(목표온도)	30℃	20℃	35℃

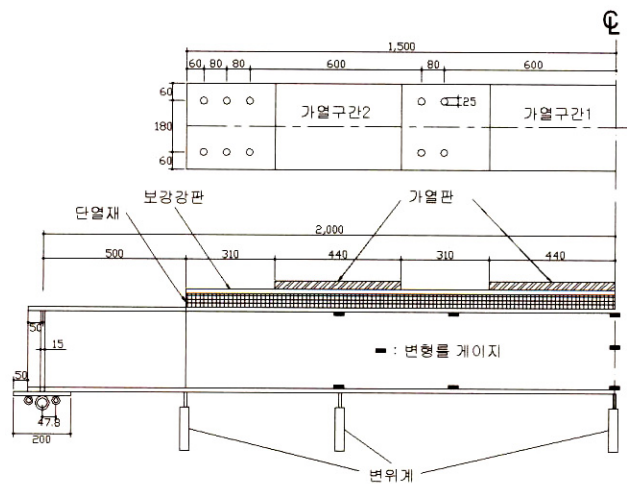


그림 11. 모형시편의 제원과 측정게이지 부착위치 (단위:mm)

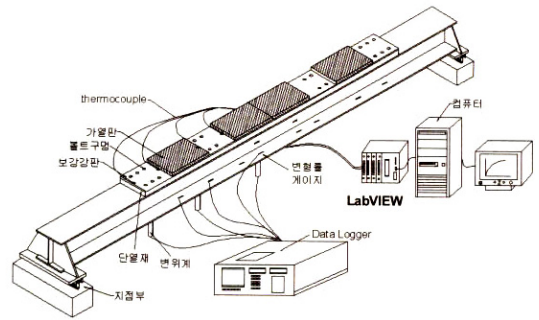


그림 12. 실험장비의 배치

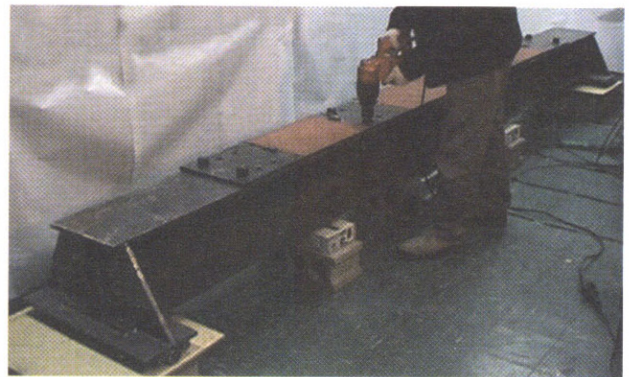
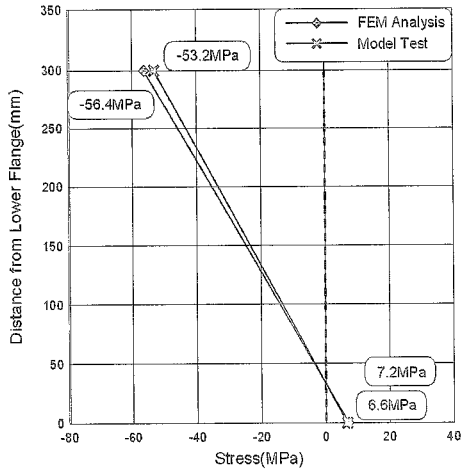


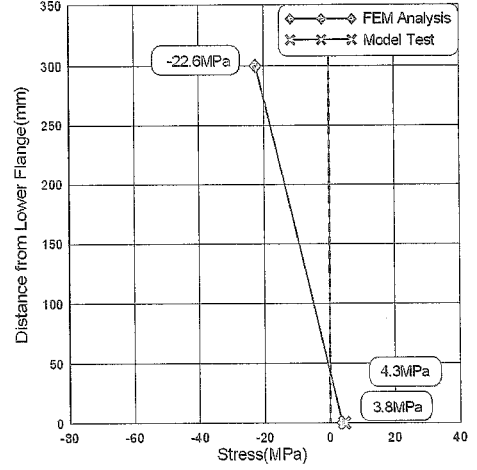
그림 13. 커버플레이트의 다단계 온도분포 유도 후 고장력 볼트체결

4.2 실험결과 및 분석

모형실험결과 다단계 온도분포에 의하여 H형강에 도입된 응력은 그림 14~16과 같이 나타났다. 실험결과로부터 H형강 상하부 플랜지에 온도프리스트레싱으로 도입된 편심 축하중에 의하여 상부플랜지에는 압축력이 하부플랜지에는 인장력이 도입되고, 가열구간에 따라 다단계 프리스트레싱이 도입됨을 알 수 있으며, 유한요소해석 결과와도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 표 3의 다단계 프리스트레싱에 의한 H형강 중앙부의 변위에서도 확인할 수 있다. 실험결과에서 커버플레이트의 온도변형으로 H형강에 도입된 응력 및 변위가 유한요소해석 결과와 비교하여 상대적으로 작게 나타났으나, 이는 본 실험에서 사용된 실리콘러버 가열판 내부의 열선배치가 일정하지 못함에 따라 커버플레이트에 도입된 온도분포가 균일하게 도입되지 못하여 발생하는 것으로, 향후 인덕션히터와 같이 전자기장을 이용한 가열판을 사용할 경우 본 실험과 같은 온도분포 불확실성의 문제는 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 실험2 가열구간2에서 H형강 상부에서 발생하는 응력은 변형률게이지의 손상으로 누락되었다.

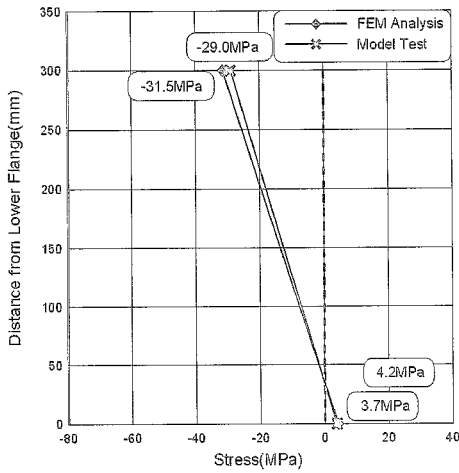


(a) H형강 응력(가열구간 1)



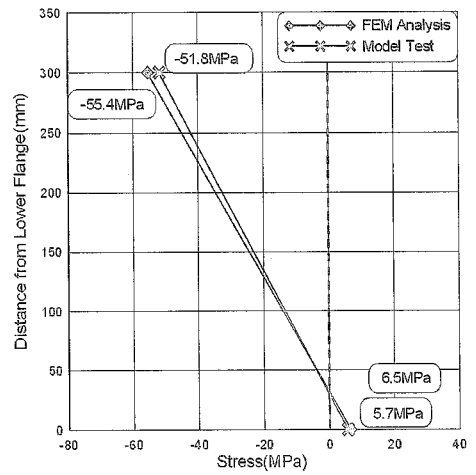
(b) H형강 응력(가열구간 2)

그림 15. 실험2 온도프리스트레싱에 의한 H형강의 응력분포

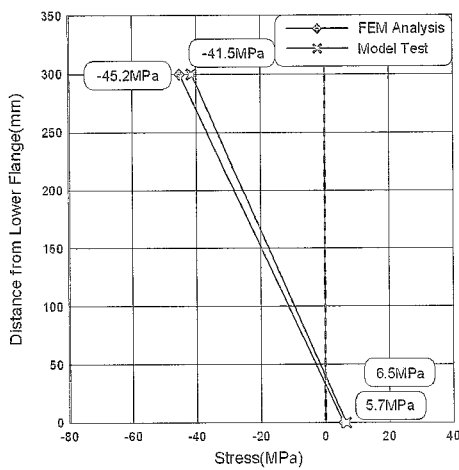


(a) H형강 응력(가열구간 1)

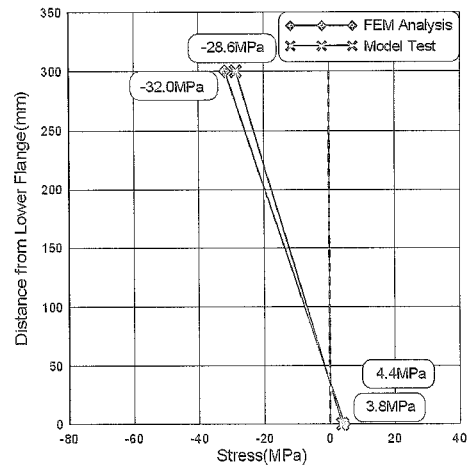
그림 14. 실험1 온도프리스트레싱에 의한 H형강의 응력분포



(b) H형강 응력(가열구간 2)



(a) H형강 응력(가열구간 1)



(b) H형강 응력(가열구간 2)

그림 16. 실험3 온도프리스트레싱에 의한 H형강의 응력분포

표 3. 온도프리스트레싱에 의한 실험별 변위

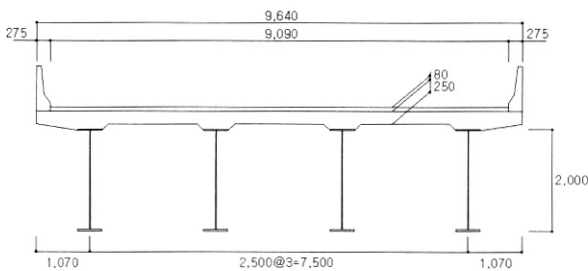
구분	구간1		구간2	
	실험	FEM	실험	FEM
실험 1	2.30 mm	2.42 mm	1.36 mm	1.44 mm
실험 2	1.54 mm	1.75 mm	1.02 mm	1.12 mm
실험 3	2.11 mm	2.27 mm	1.40 mm	1.52 mm

5. 다단계 온도프리스트레싱 보강공법을 적용한 강거더교의 보강효과

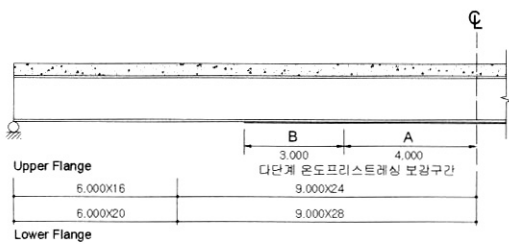
본 연구에서 제안된 다단계 온도프리스트레싱 보강공법의 효용성을 검토하기 위하여 단경간 강거더교를 대상으로 구조해석을 실시하였다. 대상교량에 대한 효용성 검토는 설계하중에 의한 대상교량의 거동을 다단계 온도프리스트레싱으로 보강한 교량의 거동과 비교·분석하였다.

5.1 온도프리스트레싱 보강공법 적용 대상교량

대상교량은 지간 30m, 교폭 9m의 단경간 강거더교로 거더와 바닥판 콘크리트는 각각 허용응력이 190MPa인 SM490 강종과 설계강도 27MPa의 콘크리트로 가정하였다. 그림 17은 대상교량의 제원 및 커버플레이트를 이용한 다단계 프리스트레싱 보강공법의 적용구간이다.



(a) 대상교량의 단면도 (단위:mm)



(b) 대상교량의 횡단면도 (단위:mm)

그림 17. 다단계 프리스트레싱 보강공법 적용 대상교량

대상교량의 구조해석은 유한요소해석프로그램인 SAP2000

을 이용하였으며, 대상교량과 커버플레이트를 frame 요소로 도형화 하였다. 그림 18은 커버플레이트를 이용한 다단계 프리스트레싱 보강공법을 적용한 대상교량의 유한요소해석 모형이다.

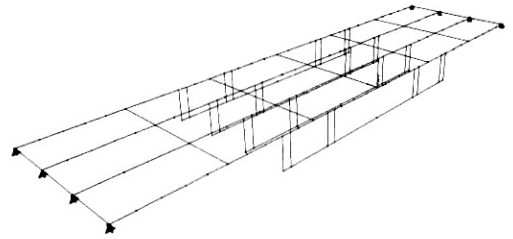


그림 18. 대상교량의 모형화

그림 19는 대상교량의 고정하중과 설계활하중에 의한 휨모멘트도이며, 곡선 (1)은 고정하중에 의한 휨모멘트, 곡선 (2)는 설계활하중에 의한 휨모멘트, 곡선 (3)은 사하중과 설계활하중에 의한 대상교량의 총 휨모멘트이다. 그림 20, 그림 21은 설계 휨모멘트에 의하여 대상교량 하부플랜지와 바닥판 상연의 콘크리트가 받는 응력으로 대상교량이 지간에 따라 단면이 변화하는 변단면 교량이므로 단면의 변화부에서 응력의 변화가 나타나고 있다. 그림 20에서 곡선 (1)은 거더의 하부플랜지에서 발생하는 합성전 응력이며, 곡선 (2)는 합성후, 곡선 (3)은 활하중, 곡선 (4)는 설계하중에 의한 강거더교 하부플랜지의 최종응력 상태이다. 그림 21은 바닥판 콘크리트의 응력상태로 곡선 (1)은 합성 후, 곡선 (2)는 활하중, 곡선 (3)은 최종응력 상태이다. 따라서 대상교량의 다단계 프리스트레싱 보강구간은 설계하중에 의한 거더의 응력수준을 고려하여 보강구간 A와 B로 나누어 다단계 프리스트레싱을 도입하는 것으로 가정하였다.

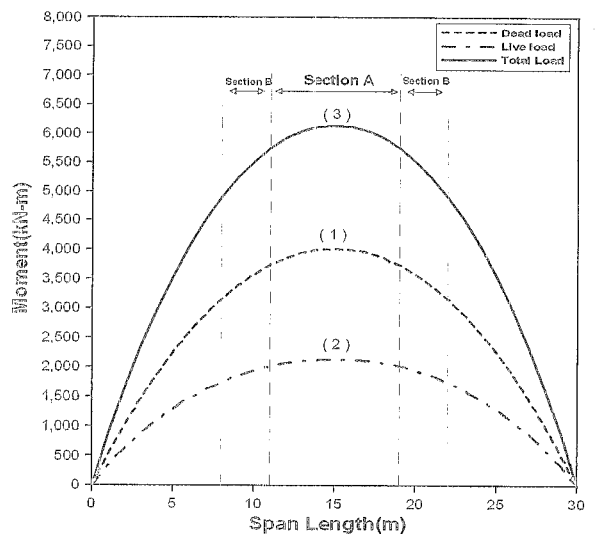


그림 19. 대상교량의 설계 휨모멘트

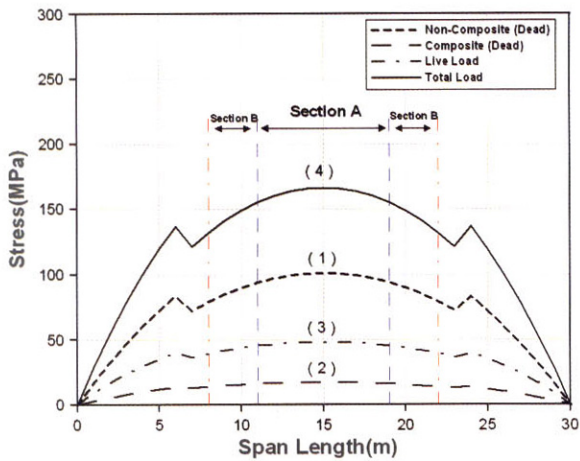


그림 20. 설계하중에 의한 강거더교 하부플랜지의 응력

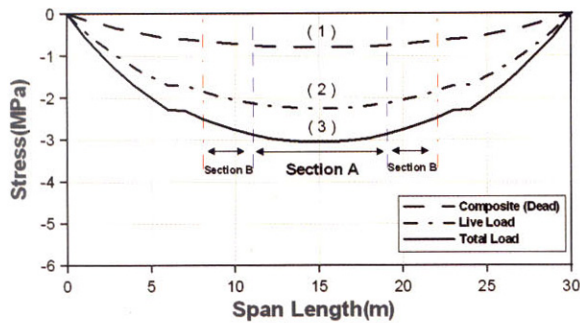


그림 21. 설계하중에 의한 강거더교 바닥판 상부의 응력

5.2 다단계 온도프리스트레싱 보강공법에 의한 보강효과

대상교량의 보강구간 A와 보강구간 B에는 그림 22와 같은 커버플레이트에 각각 70℃, 40℃의 다단계 온도프리스트레싱을 도입하는 것으로 가정하였으며, 커버플레이트는 길이 14m, 폭 45cm, 두께 1cm의 SM490 강판으로 가정하였다.

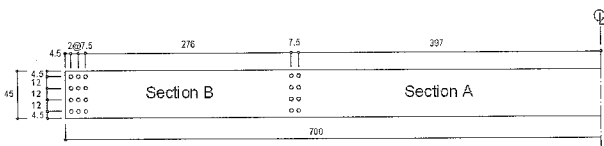


그림 22. 다단계 프리스트레싱 커버플레이트의 제원 (단위:cm)

다단계 온도프리스트레싱 보강공법에 의하여 대상교량에 도입되는 프리스트레싱은 표 4와 같으며, 설계하중 및 다단계 프리스트레싱 보강공법에 의한 최종응력상태는 표 5과 같다. 그림 23, 그림 24는 보강효과에 따른 대상교량의 하부플랜지와 바닥판 상연의 작용응력을 나타낸 것으로 곡선 (1)은 설계하중에 의하여 발생하는 응력분포이고, 곡선 (2)는 커버플레이트의

단면증가 효과를 고려한 응력분포이며, 곡선 (3)은 다단계 프리스트레싱에 의한 최종 응력분포이다.

표 5 및 그림 23, 그림 24에서 볼 수 있듯이 다단계 온도프리스트레싱 보강공법에 의하여 대상교량의 하부플랜지에서는 22%, 바닥판 상부에서는 17%의 응력이 저감되고 있다. 또한 온도분포에 따른 다단계 프리스트레싱에 의하여 강거더 하부플랜지에 작용하는 응력이 보강구간에서 125MPa의 수준으로 도입됨에 따라 보강수준에 따른 효율적인 프리스트레싱의 도입이 가능함을 알 수 있다. 그림 25는 최대 휨모멘트로 인하여 발생하는 보강구간 A의 최대 단면력을 하중상태에 따라 나타낸 것으로 커버플레이트의 온도변형에 의하여 거더에 도입된 편심 축하중으로 대상교량의 상연 및 하연에서 효과적인 프리스트레싱이 도입됨을 확인 할 수 있다.

표 4. 온도프리스트레싱에 의한 보강효과 (단위:MPa)

구간	단면증가			프리스트레싱			최종응력도입		
	f_{sl}	f_{su}	f_{cu}	f_{sl}	f_{su}	f_{cu}	f_{sl}	f_{su}	f_{cu}
A	-7.73	+0.32	+0.11	-29.42	+0.95	+0.45	-37.15	+1.28	+0.56
B	-7.12	+0.28	+0.10	-16.80	+0.55	+0.26	-23.92	+0.83	+0.36

* f_{sl} : 강거더 하부플랜지 응력, f_{su} : 강거더 상부플랜지 응력, f_{cu} : 바닥판 상연의 응력

표 5 온도프리스트레싱 보강공법에 의한 최종 응력 (단위:MPa)

구간	설계하중			온도보강공법			응력감소효과(%)		
	f_{sl}	f_{su}	f_{cu}	f_{sl}	f_{su}	f_{cu}	f_{sl}	f_{su}	f_{cu}
A	+165.7	-120.5	-3.0	+128.6	-121.8	-2.5	+22.4	-1.06	+16.7
B	+148.6	-107.3	-2.8	+124.7	-108.2	-2.4	+16.1	-0.8	14.3

* f_{sl} : 강거더 하부플랜지 응력, f_{su} : 강거더 상부플랜지 응력, f_{cu} : 바닥판 상연의 응력

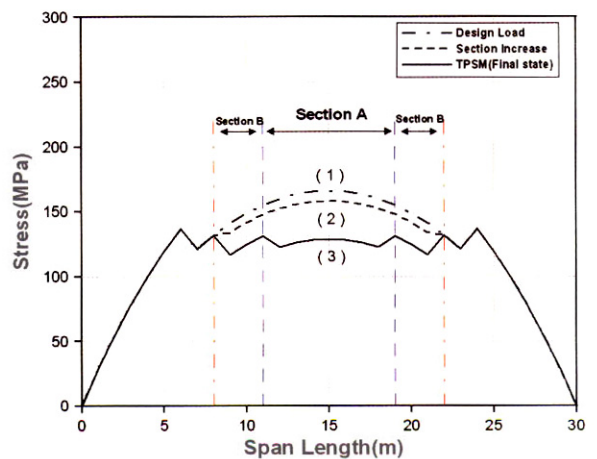


그림 23. 온도프리스트레싱 보강에 의한 하부플랜지의 응력

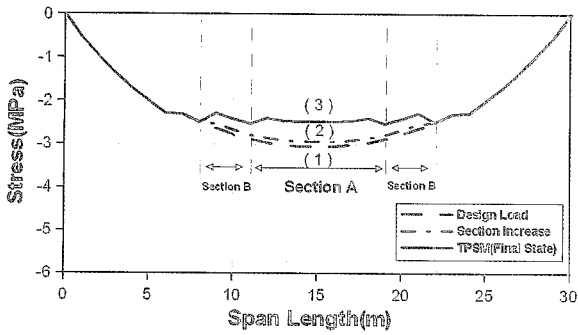


그림 24. 온도프리스트레싱 보강에 의한 바닥판 상부의 응력

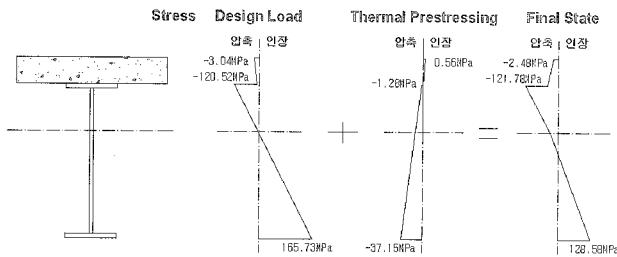


그림 25. 온도프리스트레싱 보강공법에 따른 보강구간 A의 응력상태

6. 결론

본 연구는 교량의 보강공법으로 커버플레이트의 온도변형을 이용한 다단계 온도프리스트레싱 보강공법을 제안하고 그 적용성 분석을 위하여 커버플레이트의 온도변형에 의한 프리스트레싱 도입 및 열전달 해석을 수행하였으며, 단경간 강거더교를 대상으로 본 연구에서 제안된 보강공법의 효율성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 커버플레이트의 온도분포에 의하여 도입되는 프리스트레싱력 및 커버플레이트의 변형량의 결정을 위한 커버플레이트의 열전달 이론해를 유한요소해석과 모형실험을 통하여 검증하였다. 본 연구에서 제안한 열전달 이론해가 유한요소해석 및 실험결과와 매우 잘 일치하고 있으므로 커버플레이트의 설계 및 해석에 제안된 열전달 이론식을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 강거더 모형실험을 통하여 다단계 온도분포가 도입된 커버플레이트의 냉각에 따라 도입된 편심하중으로 강거더의 하부플랜지와 상부 플랜지에 프리스트레싱이 도입됨을 확인하였다. 온도변형에 의하여 모형거더에 도입된 응력 및 변위가 유한요소해석 결과와 잘 일치하며, 커버플레이트의 도입 온도에 의하여 프리스트레싱력의 크기가

가 변화됨을 알 수 있다. 따라서, 보강수준에 따른 커버플레이트의 온도분포를 달리하면 온도분포에 따른 다단계 프리스트레싱력의 도입으로 거더의 보강에 필요한 효율적인 응력도입이 가능함을 알 수 있다.

- (3) 다단계 온도프리스트레싱 보강공법을 지간 30m의 단경간 강거더교에 적용한 결과, 다단계 프리스트레싱에 의하여 지간중앙부에서 약 22% 응력이 감소됨을 확인하였다. 따라서 커버플레이트의 다단계 온도변형을 이용한 보강공법을 다양한 강거더교에 적용할 경우 프리스트레싱 효과와 단면증가 효과에 의하여 효율적이며 효과적인 보강수단으로써 적용가능 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)승화이엔씨의 연구비 지원 및 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원을 받아 연구된 것으로 본 연구를 가능케 한 (주)승화이엔씨 및 교육인적자원부에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김상호, 안진희, 김준환 (2006) 커버플레이트의 온도변형을 이용한 강구조물의 다단계 프리스트레싱, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 심사중
- 박용걸, 박영훈, 이승용 (2000) 외부 후 긴장 공법을 이용한 강합성보의 보강에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제12권, 제5호, pp. 594-558
- 건설교통부, 도로설계편람(III), 2000
- 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005
- Shiming C. and Ping G. (2005) Load carrying capacity of composite beams prestressed with external tendons under positive moment, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, pp. 515~530.
- Wojciech L. and Ernest K. (2006) Behavior of composite beams prestressed with external tendon: Experimental study, *Journal of Constructional Steel Research*, In Press
- (접수일자 : 2006. 9. 15 / 심사일 2006. 10. 13 / 심사완료일 2006. 10. 26)