



콘크리트 교량의 보강을 위한 온도 프리스트레싱 공법의 실험적 연구

안진희^{1)*} · 김준환¹⁾ · 최규태¹⁾ · 김상호¹⁾

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부

An Experimental Study on Thermal Prestressing Method for Strengthening Concrete Bridge

Jin-Hee Ahn^{1)*}, Jun-Hwan Kim¹⁾, and Kyu-Tae Choi¹⁾, and Sang-Hyo Kim¹⁾

¹⁾Dept. of Civil & Environment Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT Traditional external post-tensioning method using either steel bars or tendons is commonly used as a retrofitting method for concrete bridges. However, the external post-tensioning method has some disadvantages such as stress concentration at anchorages and inefficient load carrying capability regarding live loads. Thermal prestressing method is a newly proposed method for strengthening and rehabilitation of concrete girder bridges. Founded on a simple concept of thermal expansion and contraction of steel, the method is a hybrid method of external post-tensioning and steel plate bonding, combining the merits of two methods. In this paper, basic concepts of the method are presented and an illustrative experiment is introduced. From actual experimental data, the thermal prestressing effect is substantiated and the FEM approach for its analysis is verified.

Keywords : thermal prestressing, strengthening, steel plate bonding, external post-tensioning

1. 서 론

교량 구조물은 중요 사회간접시설로 공용 기간 동안의 환경조건 변화, 차량의 중량화 등으로 인하여 지속적인 내하 성능저하가 발생하게 된다. 내하 성능이 저하된 교량의 안전성을 확보하고 교통 조건을 개선시키기 위한 방법으로 기존 교량의 교체나 내하 성능이 저하된 교량을 보강하여 재사용하는 방법들이 다양하게 제안되고 있다¹⁾. 내하 성능이 저하된 교량의 교체는 경제적·시간적 문제뿐 아니라 교통 체증과 같은 사회적 문제도 유발할 수 있으므로, 교량의 보강을 통하여 교량의 내하 성능의 개선이 가능한 경우 적절한 보강 방법을 이용하여 내하 성능을 확보하는 것이 다양한 측면에서 합리적일 수 있다.

현재 국내에서 사용되고 있는 교량의 주요 보강 공법으로는 강판이나 탄소섬유 등을 교량 하부에 직접 부착하는 단면 부착 공법, 교각 증설 공법 그리고 외부 강봉을 이용하여 교량에 프리스트레싱을 도입하는 후 인장 공법 등이 있다¹⁻⁵⁾. 면 보강 공법은 교량의 하부에 강판이나 탄소섬유 등을 부착함으로써 교량의 휨강도 및 전단강도를 단순히 증가시킨 것으로 경제적이나 보강에 사

용된 재료와 교량과의 영구적인 부착성에 대한 신뢰도가 낮다⁴⁾. 교각 증설 공법은 기존 교량에 추가적으로 교각을 증설하여 기존 교량의 지간을 개선하여 작용 하중을 감소시킨 것으로, 추가적으로 발생하는 부모멘트부의 처리가 용이하지 않으며 다른 보강 공법과 비교하여 비경제적이다. 외부 강봉을 이용한 보강 공법은 적용 범위가 넓고, 교량의 극한 및 항복에 대한 강성을 증가시키므로 휨보강 효과가 뛰어나지만 프리스트레싱 정착부 설치 및 설계가 어렵고⁵⁾ Fig. 1과 같이 프리스트레싱 정착부의 과도한 응력집중으로 인장균열이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 기존 콘크리트 교량의 보강 공법의 장점을 극대화하고 단점을 개선한 새로운 보강 공법으로 단면보강 효과와 프리스트레싱 효과를 결합한 온도 프리스트레싱 (thermal prestressing method) 보강 공법을 제안하고자 한다. 온도 프리스트레싱 공법은 강재의 열팽창·수축 특성을 이용한 공법으로⁶⁾, 프리스트레싱 도입을 위하여 강판을 인위적으로 가열하여 팽창된 강판을 거더의 하부에 고정된 후 강판의 냉각으로 도입되는 온도 수축력을 교량의 보강에 필요한 프리스트레싱력으로 이용하는 공법이다.

본 연구에서 제안된 온도 프리스트레싱 보강 공법의 적용을 위한 기초적인 연구로 프리스트레싱 보강 강판을 콘크리트 교량에 설치하기 위한 고정장치의 마찰저항 강

*Corresponding author E-mail : palanorange@yonsei.ac.kr
Received January 15 2007, Accepted May 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

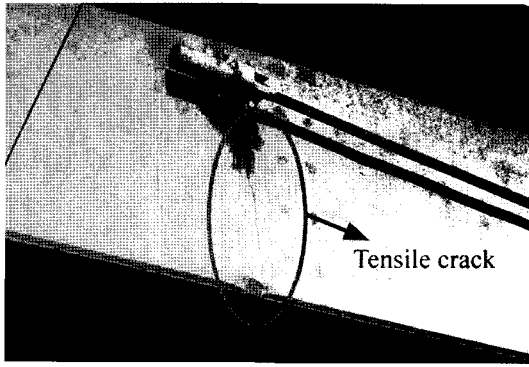


Fig. 1 Tensile crack of concrete bridge

도실험과 온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 교량에 도입되는 프리스트레싱 효과의 확인을 위한 응력 도입 실험을 실시하였다.

2. 온도 프리스트레싱 보강 공법

2.1 공법 개요

온도 프리스트레싱을 이용한 콘크리트 교량의 보강 공법은 일시적으로 가열한 프리스트레싱 보강 강판을 보강이 필요한 교량의 하부에 고정시킨 후, 강판의 냉각으로 도입되는 수축력을 교량의 보강에 필요한 프리스트레싱력으로 이용한 공법으로 보강 강판에 의한 단면 증가와 프리스트레싱의 효과를 동시에 얻을 수 있다. 또한 강판의 도입 온도를 필요한 보강 성능에 따라 단계별로 도입되는 다단계 온도 프리스트레싱력으로 효율적인 응력 도입과 정착부의 응력집중 문제도 감소시킬 수 있다.

온도 프리스트레싱 보강 공법은 Fig. 2와 같이 (a) 콘크리트 교량의 하부에 고정장치의 설치, (b) 프리스트레싱 보강 강판에 다단계 온도 도입, (c) 보강 강판과 고정장치의 강결로 진행되며, Fig. 2(c)와 같이 온도 프리스트레싱에 의한 편심 축하중에 의하여 교량에 축력과 모멘트로 도입되게 된다.

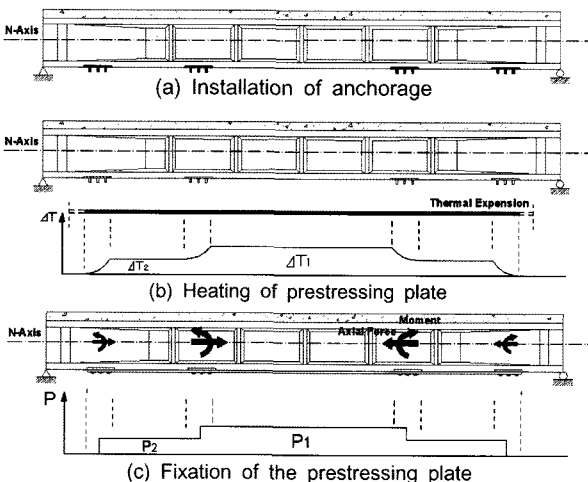


Fig. 2 General sequence of construction using multi-stepwise TPMS

온도 프리스트레싱 보강 공법에 의하여 PSC 거더와 같이 초기 프리스트레싱이 도입된 콘크리트 교량에 도입되는 응력은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 곡선 (a)는 설계 하중에 의한 콘크리트 교량 하부의 응력 상태이며, 곡선 (b)는 프리스트레싱 보강 강판의 단면 증가에 의한 거더의 응력상태, 곡선 (c)는 온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 교량에 도입된 최종 응력 상태이다.

프리스트레싱 보강 강판에 의하여 콘크리트 교량에 도입되는 프리스트레싱력은 보강 강판의 가열에 의한 자유 팽창량과 가열된 강판을 고정시킨 후 발생하는 최종 수축량에 대한 평형 방정식과 적합 방정식 및 변위 관계식을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 식 (2)와 (3)은 온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 교량의 상·하연에 도입된 프리스트레싱이다⁷⁾.

$$P = \frac{\alpha(T_p - T_\infty)EA_pA_GI_G}{A_GI_G + A_pI_G + A_pA_G \cdot e \cdot y} \quad (1)$$

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

$$f_t = \frac{P}{A_G} + \frac{P \cdot e}{I_G} (H - y) \quad (3)$$

여기서, T_p 는 보강 강판의 도입 온도, P 는 보강 강판의 냉각에 따른 수축력, f_b 는 온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 교량의 하연에 도입된 프리스트레싱, f_t 는 온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 교량의 상연에 도입된 프리스트레싱, α 는 강재의 열팽창계수, E 는 탄성계수, A_p 는 보강 강판의 단면적, A_G 는 콘크리트 교량의 단면적, I_G 는 콘크리트 교량의 단면 2차모멘트, e 는 프리스트레싱 편심축하중의 편심거리, H 는 콘크리트 교량의 높이, y 는 콘크리트 교량의 중립축에서 거더 하연까지의 거리이다.

2.2 온도 프리스트레싱 보강 공법 적용을 위한 장치

온도 프리스트레싱 보강 공법을 콘크리트 교량에 적용하기 위하여 필요한 장치는 Fig. 4와 같이 프리스트레싱 도입 부재인 프리스트레싱 보강 강판, 보강 강판과 콘크리트 교량간의 고정을 위한 고정장치, 그리고 보강 강판을 가열하기 위한 가열 장비로 구성된다.

프리스트레싱 보강 강판은 콘크리트 교량에 고정되어

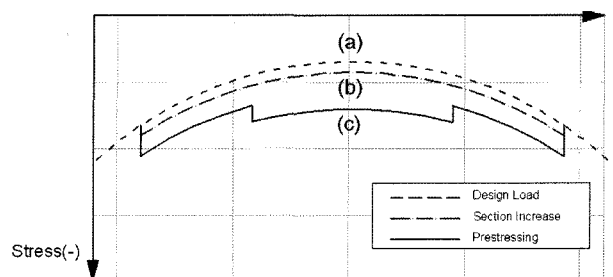


Fig. 3 Stress distribution due to load state

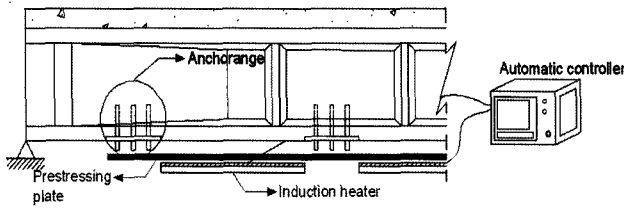


Fig. 4 Prestressing system of TPSM

온도 프리스트레싱에 의한 프리스트레싱력을 도입하는 부재로 프리스트레싱에 의하여 거더에 작용하는 인장력과 사용하중에 의한 인장력에 저항하기 위하여 SM570⁸⁾과 같은 고장력 강이 사용되며, 단단계 프리스트레싱력의 도입을 위하여 Fig. 5와 같이 보강 강판에는 단단계 정착부가 설치되게 된다.

고정장치는 보강 강판과 콘크리트 교량의 고정을 위한 장치로 Fig. 6과 같이 콘크리트에 정착되는 앵커볼트와 고정판 그리고 고장력볼트로 구성된다.

Fig. 7은 가열 장비는 콘크리트 교량의 보강 수준에 따른 프리스트레싱력을 도입하기 위하여 보강 강판의 가열에 사용되는 가열 장비로 보강 강판의 가열과 콘크리트 교량과의 상대 온도차를 일정하게 유지하기 위한 인덕션 가열판과 자동 온도조절 장치로 구성된다. 인덕션 가열판은 자기장에 의하여 금속만을 가열할 수 있는 장비이며, 자동 온도조절 장치는 콘크리트 교량과 보강 강판의 온도를 확인하고 상대 온도차를 일정하게 유지하기 위한 온도센서 (thermocouple)가 부착되어 있다. Table 1은 가열 장비의 제원이다.

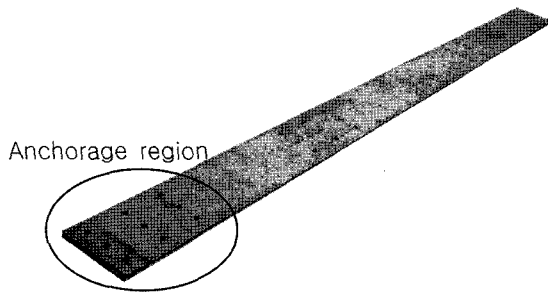


Fig. 5 Prestressing plate of TPSM

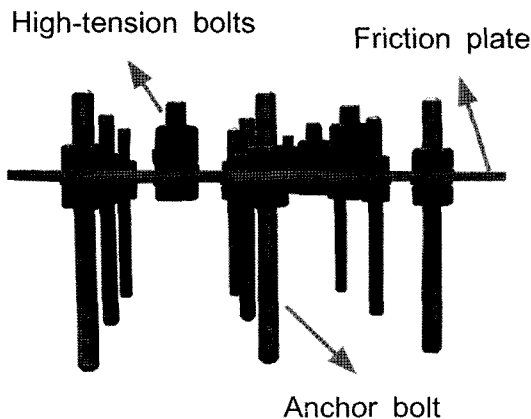
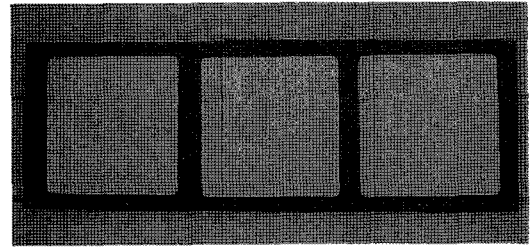
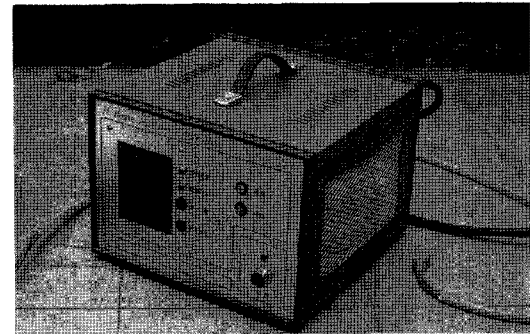


Fig. 6 Anchor system of TPSM



(a) Induction heating plate



(b) Automatic controllers

Fig. 7 Heating system of TPSM

Table 1 Dimension of heating system

	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Weight (N)
Induction heater	990	330	32	85.5
Automatic controller	210	300	300	85

3. 온도 프리스트레싱 도입을 위한 고정장치의 마찰 저항 강도 실험

3.1 실험 개요

고정장치는 프리스트레싱을 도입하는 보강 강판을 콘크리트 교량에 고정시키기 위한 것으로 온도 프리스트레싱력과 사용하중에 저항할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 온도 프리스트레싱 도입을 위한 고정장치를 제안하고, 제안된 고정장치의 적용 및 설계를 위하여 마찰저항 강도 실험을 실시하여 제안된 고정장치의 마찰저항 성능을 평가하였다.

본 연구에서 제안한 고정장치는 Fig. 8과 같이 앵커볼트, 고장력볼트, 마찰판으로 구성되며, 보강 강판의 온도 수축에 발생하는 수축력의 전달이 앵커와 볼트의 체결에 의한 프리스트레싱 강판과 마찰판의 마찰에 의해서만 이루어지고, 미끄러짐에 따른 볼트의 지압응력이 발생하지 않도록 하였다⁹⁾.

제안된 고정장치의 마찰저항 성능은 Fig. 9와 같이 PSC 거더의 하부 모형을 이용한 직접전단 (push out) 실험을 통하여 발생하는 PSC 거더 하부 모형 시편과 강판의 하중-상대 변위 관계를 이용하여 고정장치부의 마찰저항 성능을 평가하였다.

고정장치의 마찰저항 성능 평가를 위하여 사용된 볼트는 M24 F10T⁸⁾의 고장력볼트를 사용하였으며, 앵커는

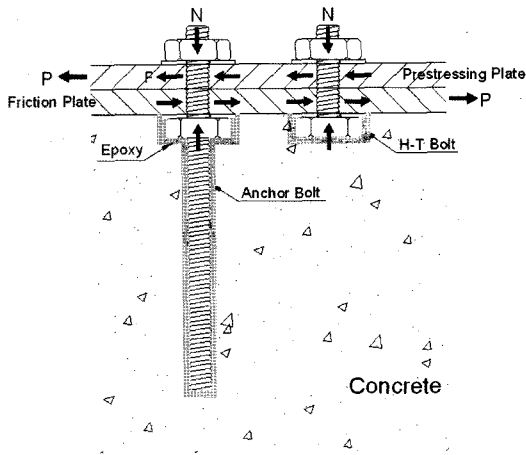


Fig. 8 Interaction of proposed anchor system

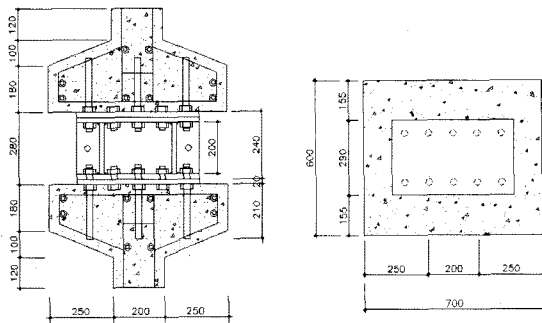


Fig. 9 Specimen for push-out test

F10T[®]고장력볼트와 동일한 기계적 성질을 가지며 지름이 24 mm인 앵커볼트를 사용하였다. 또한 콘크리트와 고장력볼트 및 앵커볼트의 정착에는 HILTI RE500 에폭시¹⁰⁾를 사용하였다.

마찰면 수에 따른 고정장치의 마찰저항 성능 평가를 위하여 마찰면이 1면, 3면, 5면인 경우에 대하여 Table 3과 같이 3종류의 시편을 제작하였다. 여기서 마찰면은 각 시편의 마찰판과 앵커볼트나 고장력볼트가 접하고 있는 면으로 1면 마찰면 시험체의 경우 PSC 거더 모형의 양쪽면에 1면 마찰면을 가지는 경우이다. Table 3은 제안된 고정장치의 마찰저항 성능 실험에 사용된 고정장치의 마찰면과 앵커 및 볼트의 개수이다.

하중 제한에 따른 하부 모형 시편과 강판의 상대 변위는 Fig. 10과 같이 시편의 측면에 변위계 (LVDT)와 균열계 (crack gage)를 설치하고 data logger (TDS-601)를 이용하여 이를 측정하였으며, 2,000 kN 만능시험기 (UTM)로 재하 하였다. Fig. 11은 마찰저항 성능을 평가하기 위하여 만능시험기에 설치된 시편의 시험 모습이다.

Table 3 Specimens for push-out testing

Specimen	Slip resistance (bolt area)	Anchor	Bolt
F-1	1(2)	1	-
F-3A	3(6)	1	2
F-3B	3(6)	1	2
F-5	5(10)	3	2

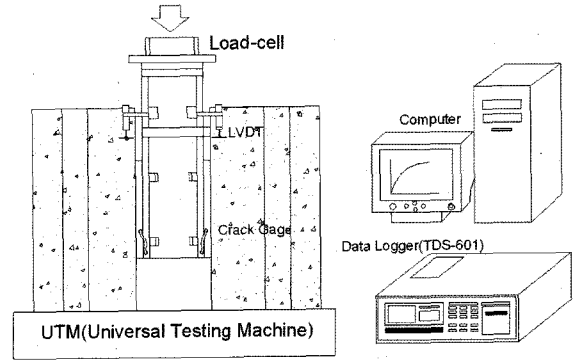


Fig. 10 Test setup for push-out test

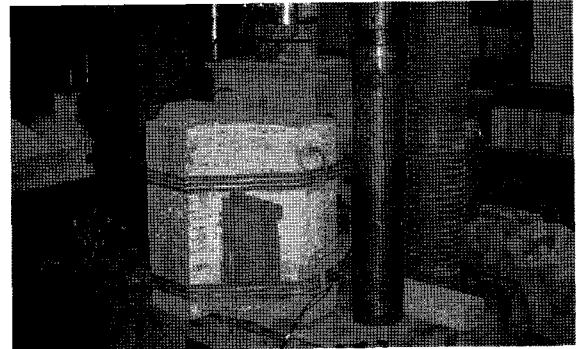


Fig. 11 Specimens and UTM

3.2 고정장치의 마찰저항 실험 결과 및 분석

본 연구에서 제안된 고정장치는 프리스트레싱 보강 강판과 마찰판의 마찰 이음을 통하여 온도 프리스트레싱력을 전달하는 형태이므로 도로교설계기준 (2005)⁸⁾ 및 AISC 기준¹¹⁾에 제안된 고장력볼트 이음에 대한 기준을 이용하여 이를 평가하였다.

마찰 이음의 파괴는 AISC기준에서 접합면에서 발생하는 미끄럼 변위가 0.5 mm (≒0.02 in)인 경우로 제시하고 있으므로 본 연구에서는 제안된 고정장치 마찰 이음의 파괴하중을 콘크리트 시편과 강판의 상대 변위가 0.5 mm 발생하는 하중으로 규정하였다. 또한 고장력볼트의 마찰 이음에서 마찰면당 허용되는 마찰 이음의 허용력은 마찰 이음의 마찰저항력을 마찰저항에 대한 안전율로 나눈 값으로 식 (4)와 같이 평가되므로, 마찰저항 실험 결과를 마찰 이음에 대한 안전율을 고려하여 평가하였다. 식 (4)에서 ρ_a 는 볼트 한 개의 마찰면당의 허용력 (kN)이며, S는 이음의 미끄럼에 대한 안전율 1.7이며, μ 는 마찰계수 (0.4), N은 설계 볼트 축력이다.

$$\rho_a = \frac{R_s}{S \cdot F} = \frac{1}{S} \times \mu \times N \quad (4)$$

도로교설계기준 (2005)에 따르면 고장력볼트를 사용하는 경우 볼트 1개로는 부재와의 밀착성이 충분하지 못할 우려가 있으며 조립시를 고려하여 최소 2개로 규정하고 있으나, 제안된 고정장치의 마찰이음 최소 저항력을 측정하기 위한 기초적인 실험으로 1면 마찰 실험을

실시하였다.

Fig. 12는 1면 마찰 이음 실험의 하중-상대변위 곡선으로 실험 결과 마찰 이음의 허용력이 56.0 kN을 초과하는 것으로는 나타났으나, 고장력볼트 한 개당의 허용력 식 (4)의 이음의 미끄럼에 대한 안전율인 1.7을 고려할 경우 그 값은 95.2 kN (시편 2면 = 112.0 kN)에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 도로교설계기준에서 설명하고 있는 바와 같이 1면 마찰로 인하여 부재와의 완전한 밀착이 이루어지지 못하고, 하중 저항에 대한 마찰면의 상대적 편심으로 인하여 마찰저항 성능이 떨어진 것으로 판단된다.

Figs. 13, 14는 마찰 이음이 3면인 경우의 하중 상대 변위 곡선으로 마찰 이음의 허용력이 168.0 kN을 충분히 만족하고, 미끄럼에 대한 안전율을 고려한 285.6 kN (시편 6면 = 571.2 kN)을 상회하는 것으로 나타났다. Fig. 15는 마찰 이음이 5면인 경우의 하중 상대 변위 곡선으로 마찰 이음의 허용력이 280 kN을 충분히 상회하고, 미끄럼에 대한 안전율을 고려한 476 kN (시편 10면 = 952 kN)을 만족하는 것으로 나타났다. Table 4는 안전율을 고려한 설계기준과 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

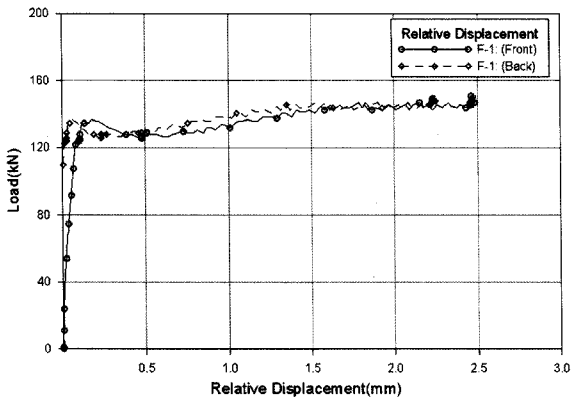


Fig. 12 Slip resistance for 1 bolt area

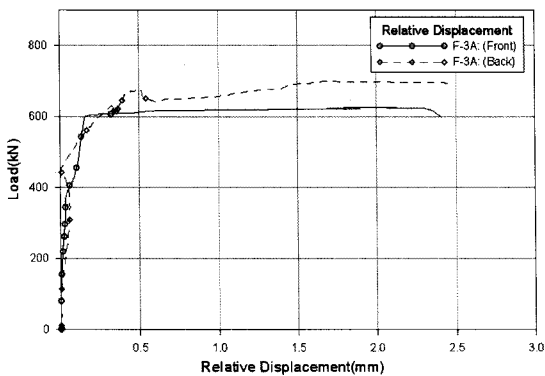


Fig. 13 Slip resistance - A for 3 bolt area

Table 4 Result of push-out test

Specimen	Specification (kN)	Safety margin (kN)	Experiment (kN)	Experiment/safety margin
F-1	56.0	95.2	66.0	0.69
F-3A	168.0	285.6	302.5	1.06
F-3B	168.0	285.6	315.0	1.10
F-5	280.0	476.0	521.0	1.09

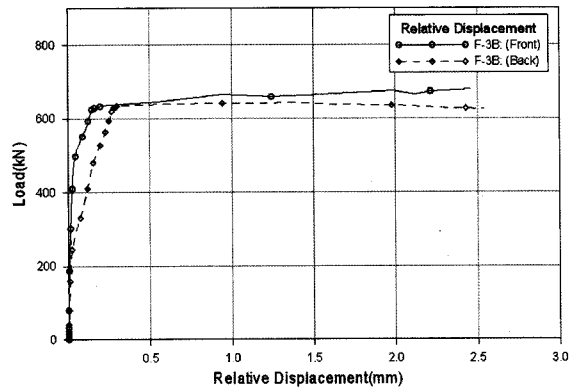


Fig. 14 Slip resistance-B for 3 bolt area

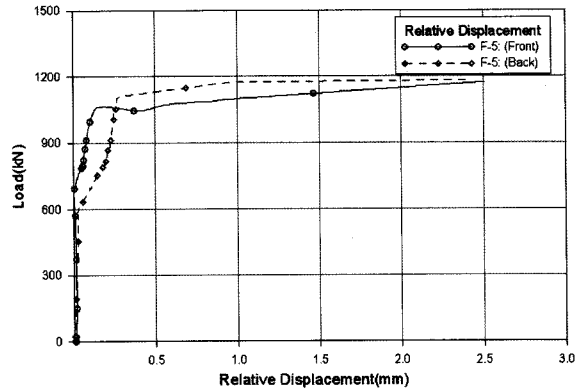


Fig. 15 Slip resistance for 5 bolt areas

본 연구에서 제안된 고정장치에 대한 마찰저항 실험 결과 Table 4에서 도로교설계기준의 볼트의 최소 개수 기준을 만족하지 못하는 1면 마찰의 경우 부재와의 완전한 밀착을 기대할 수 없음에 따라 이음의 미끄럼에 대한 안전율을 고려한 경우의 마찰저항력을 충분히 만족하지 못하였으나, 마찰 이음의 무리로서 마찰면이 3면과 5면인 경우의 마찰저항 성능은 이음의 미끄럼에 대하여 충분한 안전율을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안된 고정장치가 충분한 안전율을 갖는 것으로 판단되므로, 온도 프리스트레싱을 이용한 콘크리트 구조물의 보강에 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 콘크리트 모형 시편의 온도 프리스트레싱 응력 도입 실험

4.1 실험 개요

온도 프리스트레싱에 의한 콘크리트 교량의 보강 공법 개발을 위한 기초적인 실험으로 온도 프리스트레싱에 의한 응력 도입 실험을 실시하였다. 응력 도입 실험을 위

하여 표준 단면 PSC 거더의 단면을 축소한 2분의 철근 콘크리트 보를 제작하였으며, 철근콘크리트 보 시편과 프리스트레싱 보강 강판의 연결은 앞 절에서 제안된 고정장치를 적용하여, 제안된 고정장치의 적용성을 검토하였다.

철근콘크리트 모형 보의 제원은 길이 5.2 m, 높이 0.75 m이며, 콘크리트의 설계강도는 35 MPa이다. 응력 도입을 위하여 적용된 온도 프리스트레싱 보강 강판은 길이 4.8 m, 두께 24 mm의 SM490⁸⁾ 강재를 사용하였다. 응력 도입 실험은 실험상의 편의를 위하여 거더의 하부가 아닌 상부에 온도 프리스트레싱을 도입하였다. 실제 교량의 하부에서는 사용하중에 의하여 인장력이 작용하고 상부는 압축력이 작용하며, 교량의 하부에 프리스트레싱이 도입되더라도 사용하중이 작용함에 따라 교량의 상부에서는 인장력이 발생하기 어렵다. 하지만 본 연구에서는 실험상의 편의를 위하여 모형시편의 상부에 온도 프리스트레싱을 도입함에 따라 사하중과 프리스트레싱력에 의하여 시편 하부에 인장력이 발생할 수 있으므로, 인장응력에 의한 인장균열의 제어와 시험체의 보강 그리고 프리스트레싱력의 정확한 측정을 위하여 시험체 하부에 20 mm 두께의 인장 철판을 부착하였다. Fig. 16은 모형 시편의 제원이다.

온도 프리스트레싱에 의한 응력 도입의 확인을 위하여 보강 강판을 3구간으로 나누어 1차 실험에서는 40-80-40°C의 다단계 온도 분포를, 2차 실험에서는 30-60-30°C의 다단계 온도 분포를 도입하였다. Table 5는 온도 프리스트레싱 도입을 위하여 보강 강판에 도입된 온도 분포이며, 도입 온도는 콘크리트 거더와의 상대 온도차를 의미한다.

온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 보에 도입되는 프리스트레싱은 온도 프리스트레싱의 도입으로 인장력을 받게 되는 인장부 철판의 하면과 압축력을 받는 철근콘크리트 보의 압축철근에 강재용 변형률게이지를 부착하여 도입 프리스트레싱을 계측하였으며, 가열 구간마다

Table 5 Heating temperature for TP SM (°C)

Specimen	Heating section 1	Heating section 2
TP-A	80	40
TP-B	60	30

3개의 thermocouple을 부착하여 도입 온도를 확인하였다. 프리스트레싱에 의하여 도입된 응력 및 온도의 계측은 data logger (TDS-601, LABVIEW)를 이용하였다.

Fig. 17은 도입 온도와 프리스트레싱력의 측정을 위한 thermocouple과 변형률게이지의 부착 위치이다. Fig. 18은 보강 강판에 인덕션 가열관을 이용하여 다단계 온도 분포를 도입하는 모습으로, 강판과 인덕션 가열관 그리고 콘크리트 보 사이에 단열재를 설치하여 가열된 강판에 의하여 콘크리트 보에 열이 전달되는 것을 방지하였다. Fig. 19는 온도 프리스트레싱이 완료된 철근콘크리트 보의 모습이다.

4.2 응력 도입 실험 결과

Fig. 20은 보강 강판에 40-80-40°C의 다단계 온도 프리스트레싱을 도입한 콘크리트 모형 시편의 응력 분포로

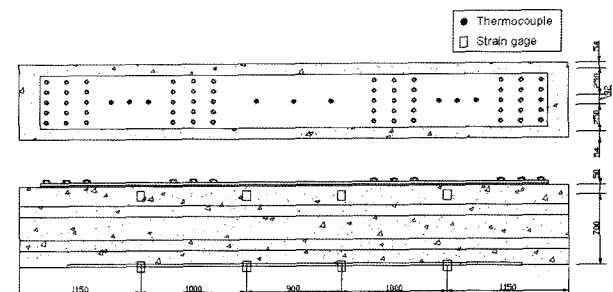


Fig. 17 Instrumentation of specimen (unit: mm)

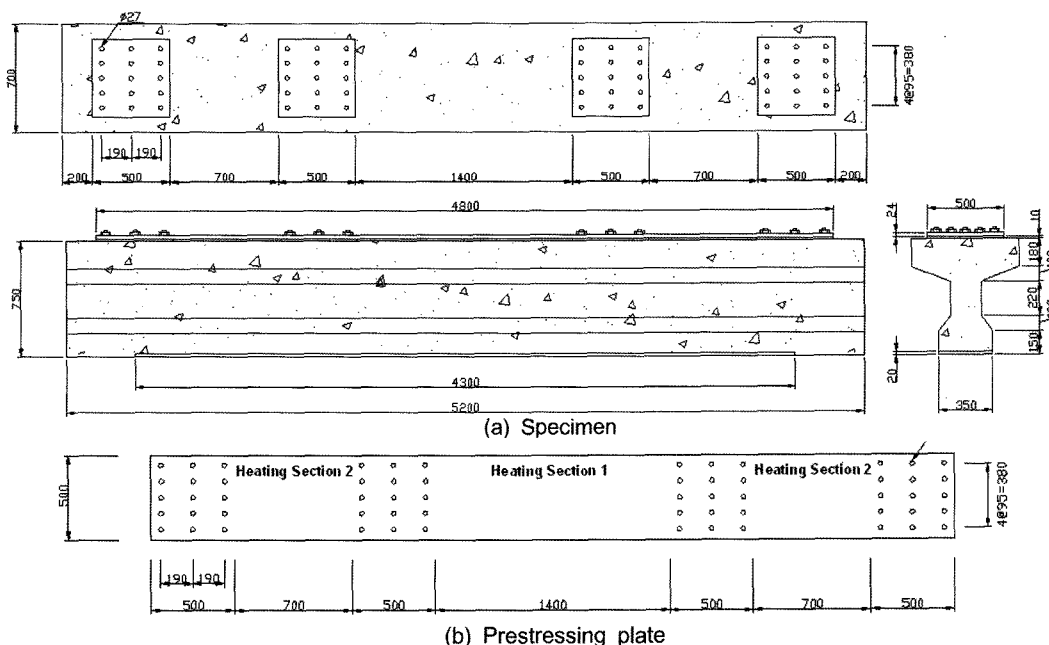


Fig. 16 Specimen for TP SM (unit: mm)



Fig. 18 Heating process of specimen

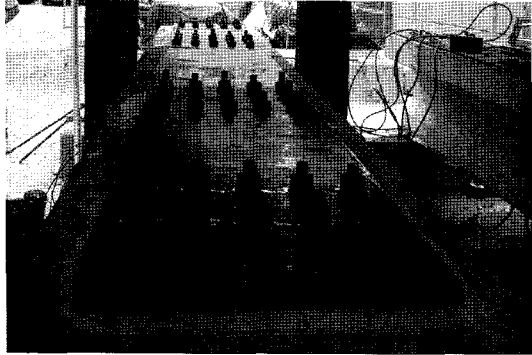


Fig. 19 Completion of TSPM

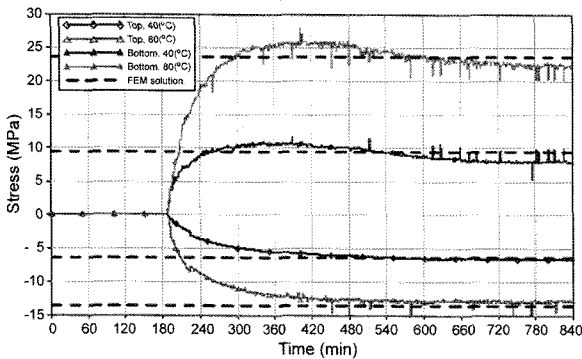


Fig. 20 Initial stress measurements (80~40°C)

프리스트레싱 강관에 도입된 다단계 온도 분포에 따라 가열구간 1의 80°C의 온도 분포가 도입된 구간 상부에서는 -12.97 MPa의 압축응력이, 하부에서는 24.39 MPa의 인장응력이 도입되며, 가열 구간 2의 40°C의 온도 분포가 도입된 구간의 경우 상부 -6.79 MPa, 하부 9.33 MPa의 응력이 도입 온도의 수준에 따라 단계적으로 도입되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS v13.5를 이용하여 해석한 결과와도 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 20에서 콘크리트 시편에 도입되는 응력은 가열을 중지한 (계측 후 180분 이후) 이후에 도입되기 시작하여 3시간 후 (계측 후 360분) 보강 강관에 도입된 온도가 완전히 냉각되어 콘크리트 시편과 동일한 온도에 도달 하였을 때 콘크리트 시편에 프리스트레싱이 도입 완료됨을 확인할 수 있다. Table 6은 콘크리트 모형 시편에 도입된 응력을 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 21은 solid 요소를 이용한 모형 시편의 유한요소해석 모형이다.

Fig. 22 및 Table 7은 보강 강관에 30-60-30°C의 다단계 온도 프리스트레싱을 도입한 결과로 40-80-40°C의 다단계

Table 6 Results of (40-80-40°C) (unit: MPa)

ΔT	80°C		40°C	
	Top	Bottom	Top	Bottom
Experiment	-12.97	24.39	-6.79	9.33
FEM	-13.55	23.71	-6.33	9.46
Error(%)	4.47	2.79	6.77	1.39

프리스트레싱 도입 결과와 같이 다단계 온도 분포에 따라 다단계 온도 분포가 도입되고 있으며, 유한요소해석 결과와 일치하고 있다. 또한 약 4일간의 지속적인 계측을 통하여 외부의 온도 변화에 관계없이 동일한 응력이 일정하게 유지되므로 외부 온도 변화에 관계없이 작용 온도 프리스트레싱력이 유효하게 작용됨을 알 수 있다.

콘크리트 모형 실험 결과 보강 강관에 도입된 다단계 온도 분포에 의하여 온도 프리스트레싱에 의한 다단계 응력 도입을 확인 할 수 있으며, 가열 온도 설정을 통하여 도입되는 프리스트레싱력을 유한요소해석 결과와 비교하여 정량적으로 조절·예측 할 수 있음을 알 수 있다. 또한 고정장치에 의하여 프리스트레싱력의 손실이 발생하지 않았으므로 제안된 고정장치의 마찰저항 성능과 그 적용성을 확인할 수 있다.

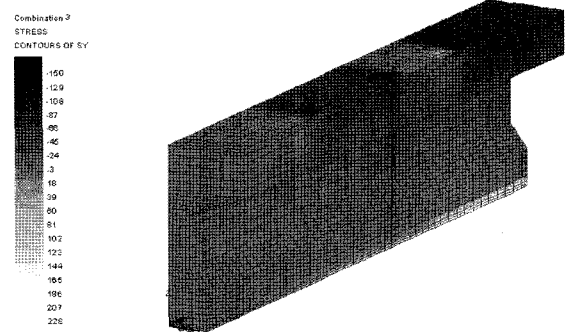


Fig. 21 Result of FEM model (40-80-40°C)

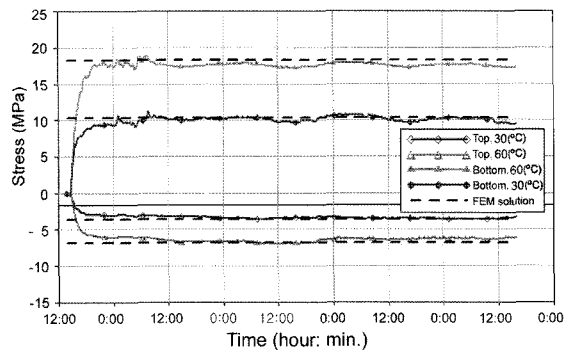


Fig. 22 Initial stress measurements (60~30°C)

Table 7 Results of (30-60-30°C) (unit: MPa)

ΔT	60°C		30°C	
	Top	Bottom	Top	Bottom
Experiment	-6.44	17.56	-3.52	10.12
FEM	-6.78	18.28	-3.67	10.24
Error(%)	5.28	4.10	4.26	1.19

본 연구는 콘크리트 교량의 새로운 보강 방법으로 보강 강판의 단면 증가 효과와 프리스트레싱을 접목한 다단계 온도 프리스트레싱 보강 공법을 제안하였다. 제안된 온도 프리스트레싱 보강 공법의 적용을 위한 기초적인 연구로 보강 강판 고정장치의 마찰저항 성능 실험과 철근콘크리트 모형 시편을 이용한 온도 프리스트레싱 응력 도입 실험을 실시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제안된 고정장치에 대한 마찰저항 실험 결과, 제안된 고정장치의 마찰저항 성능은 도로 교설계기준에서 제안하고 있는 마찰 이음의 미끄럼에 대하여 충분한 안전율 (1.7)을 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 온도 프리스트레싱을 이용한 콘크리트 구조물의 보강에 적용 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 콘크리트 모형 실험 결과 보강 강판에 도입된 다단계 온도 분포에 의하여 온도 프리스트레싱에 의한 다단계 응력도입을 확인할 수 있으며, 보강 강판에 도입되는 다단계 온도 분포를 조절하여 콘크리트, 교량의 보강에 필요한 프리스트레싱을 정량적으로 조절할 수 있음을 알 수 있다.
- 3) 본 연구는 온도 프리스트레싱을 이용한 콘크리트 교량의 보강 공법 개발을 위한 기초적 연구로 고정장치의 개발과 모형 시편에 대한 응력 도입 실험을 실시하여 제안된 온도 프리스트레싱 공법의 적용 가능성을 확인하였으나 실제 구조물에 적용을 위해서는 대형 구조물에 대한 적용성 및 시공성에 대한 검토 또한 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안된 보강 공법의 실제 적용을 위해서는 대형 콘크리트 거더를 대상으로 그 적용성 및 응력 도입 실험이 필요하고 프리스트레싱 도입에 따른 저항성능의 보강 효과에 대한 평가가 필요할 것이다.

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 ‘2004년도 건설기술연구개발사업’과 교육인적자원부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원을 받아 연구된 것으로 본 연구를 가능하게 한 건설교통부 및 교육인적자원부에 감사드립니다.

참고문헌

1. 시설안전기술공단, 콘크리트 교량의 보수·보강 방법의 표준화, BR-99-RC-051, 1999, pp.3~5.
2. 박대호, 이규철 “섬유시트로 보강된 T형 철근콘크리트 보의 휨 강도 해석”, 콘크리트학회 논문집, 15권 2호, 2003, pp.234~245.
3. 홍건호, 신영수 “RC 구조물에 적용된 부착식 휨보강 공법의 보강 성능 평가”, 콘크리트학회 논문집, 15권 1호, 2003, pp.784~86.
4. 정제평, 김대중, 모귀석, 김우, “노후 PSC-BEAM 교량의 외부 프리스트레싱 긴장 공법에 의한 보강 사례 연구”, 한국구조물진단학회 학술발표회 논문집, 2002, pp.407~412.
5. 박상렬, “외부 프리스트레싱으로 보강된 RC 보에서 강재량 및 텐던깊이에 따른 프리스트레싱 강재의 극한응력”, 콘크리트학회 논문집, 15권 4호, 2003, pp.585~593.
6. S. H. Kim, J. H. Kim, J. H. Ahn, and H. W. Song, “An Analytical Investigation of Thermal Prestressing Method for Continuous Composite Girder Bridges”, *Magazine of Concrete Research*, In Press.
7. 김상호, 안진희, 김준환, 이상용, “온도 프리스트레싱을 이용한 콘크리트교량의 보수보강에 관한연구” 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 18권 1호, 2006, pp.238~241.
8. 건설교통부, 도로교설계기준, 건설교통부, 2005, pp.50~208.
9. 한국강구조학회, 강구조공학, 한국강구조학회, 2007, pp.130~155.
10. 힐티코리아 주식회사, HILTI Fastening Technology Manual, 힐티코리아 주식회사, 2005, pp.89~106
11. American Institute of Steel Construction, *Load & Resistance Factor Design Volume I*, American Institute of Steel Construction, 1994, pp.6-389~6-398.

요 약 현재 콘크리트 교량의 보강 공법으로 주로 사용되는 외부 강봉을 이용한 후 인장 공법은 적용 범위가 넓고 교량의 극한 및 항복에 대한 강성을 증가시켜 휨보강 효과가 뛰어나지만, 모재 접합부의 응력집중, 비효율적인 하중 분배, 고정앵커부 설치, 유지관리의 어려움 등의 단점이 있다. 본 연구는 기존의 외부 강봉을 이용한 후 인장 공법이 가지는 단점을 보완하고 강판 접합 공법의 장점을 접목한 새로운 개념의 보강 공법으로 온도 프리스트레싱 보강 공법을 제안하고자 한다. 온도 프리스트레싱 보강 공법은 프리스트레싱 보강 강판을 다단계로 가열하여 가열 단계별로 콘크리트 교량의 하부에 접합한 뒤, 열원을 제거하여 발생하는 다단계 수축력을 보강에 필요한 프리스트레싱력으로 이용하는 보강 공법이다. 본 연구에서 제안된 온도 프리스트레싱 보강 공법의 적용을 위한 기초적인 연구로 프리스트레싱 보강 강판을 콘크리트 교량에 설치하기 위한 고정장치의 마찰저항 강도 실험과 온도 프리스트레싱에 의하여 콘크리트 교량에 도입되는 프리스트레싱 효과의 확인을 위한 응력 도입 실험을 실시하여 제안된 공법을 검증하였다.

핵심용어 : 온도 프리스트레싱 공법, 보강, 강판 접합 공법, 후 인장 공법