

온도 구배에 대한 P.C. 상자형 교량의 거동연구

A Study on the Behavior of P.C. Box Girder Bridge for Temperature Gradients

손기훈* 이성우**
Son, Ki Hoon Lee, Sung Woo

ABSTRACT

To study temperature effect of P.C. box girder bridge, field measurement was performed for six months, along with thermal analysis for the newly constructed viaduct of Gangbyun Highway in Seoul. Thermocouples were installed inside and surface of the flange and web of the box and temperature of box section and ambient temperature was measured. Measured environmental data are incorporated in finite element thermal analysis and computed temperature of the section was compared with measured one. Temperature gradient from thermal analysis was compared with Korean Highway Specification(1996)and the New Zealand Ministry of Works and Development code(1976). Thermal stress distribution across the box section was also compared.

1. 서론

P.C. 상자형 교량의 단면에는 순환하는 기상조건에 의하여 일교차와 연교차에 따른 온도변화가 거듭된다. 강재에 비해 상대적으로 낮은 열전도율과 두꺼운 부재단면을 갖는 P.C. 상자형 교량은 이러한 가열과 냉각의 반복과정에서, 교량 단면에 비선형 온도구배가 발생하게 된다. 이러한 온도구배는 교량단면에 상당한 변형과 복잡한 양상의 응력을 유발하는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 P.C. 상자형 교량 단면의 온도변화에 의한 거동특성을 분석하기 위하여 1997년 1월 26일 부터 7월 22일까지 서울 강변순환고속도로 중에 위치한 두모교에 대해 장기간의 현장계측을 수행하였다. 계측은 단면상의 주요지점에 부착된 온도계이기로 부터의 온도와 외기의 온도에 대하여 실시하였다. 계측된 자료를 바탕으로 열전달 해석을 수행하였고, 현장계측치와 해석치를 비교분석하였다.

온도계측 및 해석결과를 국내 P.C. 상자형 교량의 온도구배를 규정하고 있는 국내 도로교 시방규정 및 New Zeland 시방규정과 비교 분석하였다.

* 국민대학교 토목환경공학부 공학석사

** 국민대학교 토목환경공학부 교수

2. 온도거동의 개요

교량 상부단면의 온도변화는 복사, 전도, 대류의 3가지 요인에 의해 발생한다. 그중 태양열 복사에 의한 열전달은 하절기 교량단면 온도상승의 주요원인으로 분류된다. 단면 상부면의 복사량은 태양광의 입사각과 대기의 혼탁도에 의해 결정되고, 단면복부의 복사열은 교량위치의 방위각과 단면형상의 영향이 추가된다. 또한 콘크리트 상자형 교량의 표면은 다시 대류 및 전도에 영향을 받으며, 이는 풍속, 외기온도, 표면온도, 표면조도 같은 많은 변수를 포함한 온도상수와, 재료의 열물성치로 표현될 수 있다.^{[2]-[8]} 그림 3은 하절기 교량단면의 열전달 과정을 도시한 것으로 열전달 해석에 영향을 미치는 주요 조건들을 보여주고 있다.

단면에 대한 최대 온도구배는 풍부한 태양복사와, 높은 일교차, 최저풍속 등의 조건이 만족되는 하절기에 발생하며, 보통 5월에서 7월 사이에 4일에서 6일 정도로 발생하는 사실을 현장계측을 통하여 알 수 있었다. 이러한 온도구배는 교량단면의 형상 및 제원과 지역에 따른 기후인자에 따라 다양하게 변화된다. 그림 1은 온도구배에 대한 도로교 시방규정^[1]과 PCI-PTI 추천안^[4] 및 New Zealand^{[2][4]} 시방규정을 보여주고 있다. 그림 3에서는 단순보와 연속보에서 여러 가지 온도구배 양상에 따른 온도응력의 발생상태를 보여주고 있다.^[6]

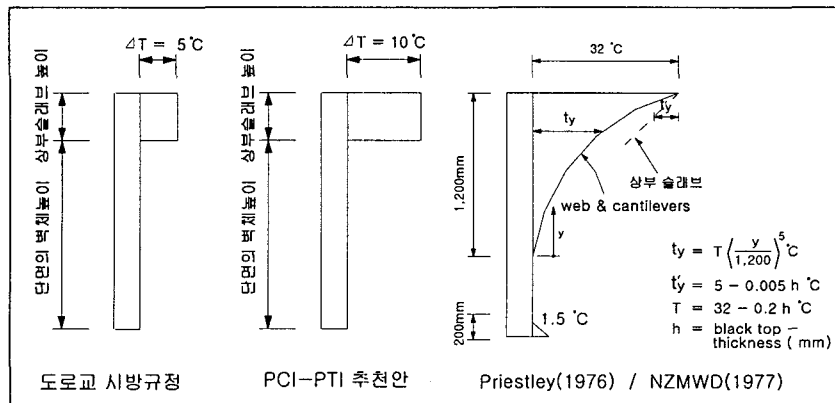


그림 1 각국의 온도 시방규정

STRUCTURE	TEMP DISTRIBUTION	STRAIN			STRESS			TOTAL THERMAL STRESS
		Axial	Curvature	Self-equilibrating	Axial	Bending	Self-equilibrating	
Simply Supported	(1)	□	Zero Strain			Zero Strain		
	(2)	▽	□	□				
	(3)	□	□	□		□	□	□
Continuous over Two Span	(1)	□	□					
	(2)	▽	□	□		□		□
	(3)	□	□	□		□	□	□

그림 2 다양한 온도구배에 따른 교량의 온도거동

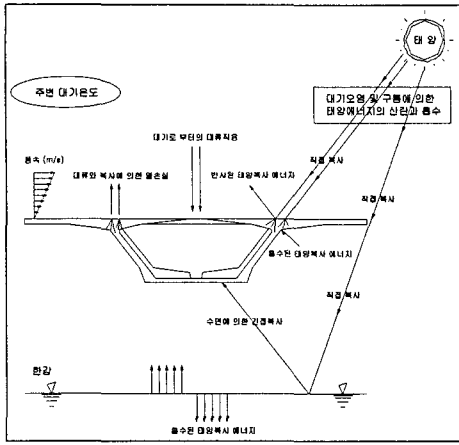


그림 3 교량단면의 열전달 과정

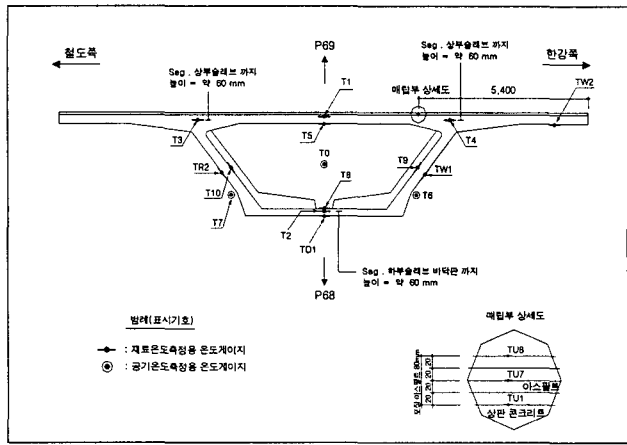


그림 4 온도 계이지 부설 위치도

3. 현장 온도 계측

현장 온도계측 대상교량은 서울시 강변도시고속도로 구간중 용산구 동빙고동(반포대교북단)~성동구 성수동 사이에 위치한 1-2공구의 두모교이다. 이 교량의 위도는 북위 37.55° 이고, 고도는 약 20m이며, 방위각은 63° 에 위치한다. 이 교량은 프리캐스트 세그멘탈 공법으로 시공된 경간장 50m의 6경간 연속 P.C. 상자형 교량으로 바닥면 상부에 8cm의 아스팔트포장을 하였다. 태양열 복사에 대해서는 동측(한강측)으로 개방구조를 갖고, 서측(철도측)으로 본 교량과 평행인 1-1공구 교량으로 인해 태양열 복사가 차단되는 구조이다. 그림 5는 교량의 단면도와 계측단면의 위치를 보여주고 있다. 그림 4에는 17개 온도계이지의 부설위치를 보여주고 있으며, 1997년 1월 21일부터 7월 22일까지 6개월간 계측을 수행하였다. 단면에 대한 온도계측 자료를 분석해본 결과 4월부터 7월 사이에 16°C정도의 단면 최대온도차가 자주 발생하는 것을 확인하였다. 포장공사를 전후하여 계측된 자료를 분석한 결과, 포장면이 교량 상부단면의 온도구배에 미치는 단열효과로 인하여 단면 최대온도차가 감소하고, 발생시간이 1시간 정도 지연되는 현상을 관찰할 수 있었다. 일출시 태양복사가 발생하는 동측 북부판(한강측)에서 계측된 온도와 복사로부터 차단된 서측(철도측)의 온도차가 최대 2°C 정도로 기록되어 측면 복사의 영향은 크지 않았다. 하절기 상부플랜지의 일일 최대 온도변화는 10°C 정도로 측정되었고, 하부플랜지의 온도변화는 3°C 정도로 측정되었다. 이는 상부플랜지는 태양열 복사에 영향을 많이 받고 하부플랜지는 대류의 영향을 주로 받고있음을 의미한다.

단면에 대한 현장계측데이터는 측정된 외기온도 및 기상관측소 자료로 입수된 일사량 등의 환경인자와 재료의 열물성치를 입력하여, 유한요소 온도해석으로 계산된 단면 온도값과의 비교분석에 사용되었다. 이러한 비교를 통하여 해석치의 적절성을 확인하였다.

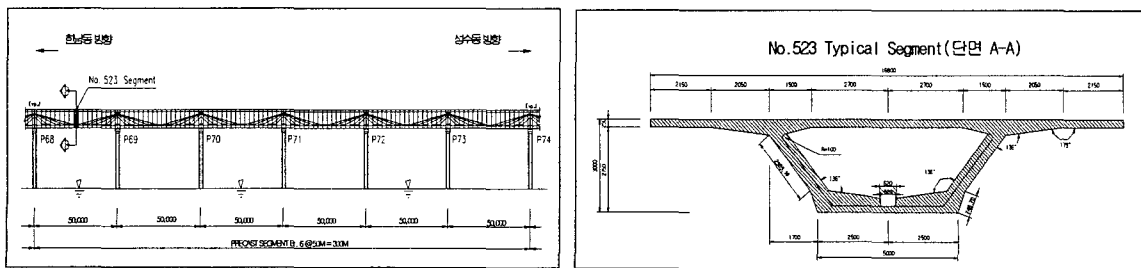


그림 5 대상교량의 단면제원

4. 온도분포의 수치해석

온도해석에는 유한요소 온도해석 프로그램인 FETAB(Finite Element Thermal Analysis of Bridges)^[3]를 사용하였다. 한 단면에 대해 2차원 과도해석(transient analysis)을 수행하여, 그 결과가 교축방향의 모든 단면에서 동일하다고 가정하였다. 이 프로그램은 다양한 환경인자와 위치데이터를 해석에 적절히 반영할 수 있도록 개발되었다. 표 1에는 해석에 사용된 환경인자의 입력치를 보여주고 있고, 표 2에는 입력된 대류 열전달계수(W/m²°C) 및 경계조건을 보여주고 있으며, 표 3에는 재료의 입력된 물성치를 보여주고 있다. 그림 6에 온도해석을 위한 유한요소 모델과, 그림 7에 온도해석에 적용된 단면 경계조건을 나타내었다.

역학적 물성치인 탄성계수와 열팽창계수는 알려진 대상교량 재료의 물성치를 사용하였고, 온도해석을 위한 열물성치는 표 3과 같이 Thurston이 제안한 콘크리트와 아스팔트의 열물성치를 사용하여 해석하였다.^{[2][5]}

표 1 환경인자 입력치

환경 인자	입력치
해석일	6월 29일
최저대기온도	23.5도
최고대기온도	30.5도
대기혼탁도	4.0
기압	0.998
위도	37.55°
태양경사도	23.448°
일출시간	오전 4시 47분
일몰시간	오후 8시 10분
고도	20m

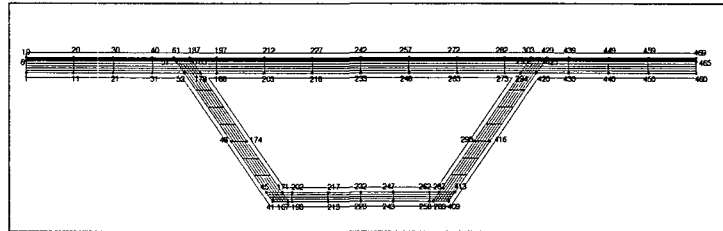


그림 6 상자형 단면 모델링

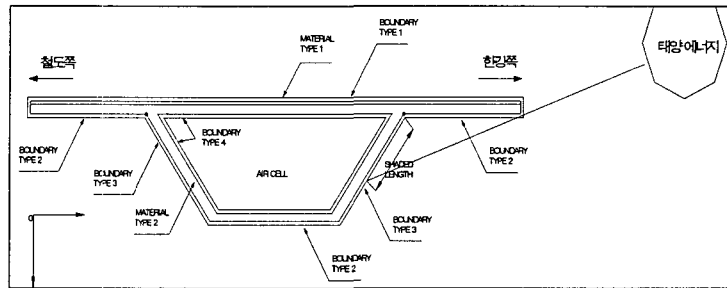


그림 7 단면 경계조건

표 2 대류 열전달 계수(W/m²°C) 및 경계조건

구 분	대류 열전달계수 (풍속 4.0m/s)	경계조건
포장면	21.0	Boundary type 1
내민보하면	17.5	Boundary type 2
상자내면	3.5	Boundary type 4
복부벽외면	19.0	Boundary type 3
하부플랜지외면	17.5	Boundary type 2

표 3 재료의 물성치

열물성치	재료	아스팔트 (Material type 1)	콘크리트 (Material type 2)
열전도율 (W/m°C)		0.744	1.384
비열 (J/kg°C)		838	922
밀도 (kg/m ³)		2240	2480
열팽창계수 (×10 ⁻⁶ /°C)		20	10
태양열흡수도		0.9	0.5
방사율		0.92	0.88
탄성계수 (kg/cm ²)		0.0	358050

이러한 환경인자와 열물성치를 입력하여 1997년 6월 29일의 온도해석을 수행한 결과, 최대온도차는 오후 4시에 나타났으며, 해석치는 14.6°C로, 계측치 15.5°C와 비교해 볼 때 서로 근접한 값으로 계산되어 해석치가 교량의 실제 온도거동을 적절히 반영해 주는 것으로 확인되었다. 따라서 전 단면 내의 온도해석치 역시 유효한 것으로 평가되었다. 그림 8에서는 철도측 단면에 대해 최대온도차를 발생시키는 오후 4시 해석치 및 계측치의 온도구배를 국내 도로교 시방규정 및 New Zealand 시방규정의 온도구배와 함께 도시하였다. 그림 8에서 알 수 있는 것과 같이 단면 수 개소의 계측치와 해석치가 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 New Zealand 시방규정의 온도구배는 해석치와 근사하게 나타났다. 국내 도로교시방서의 온도구배는 해석치와 비교하여 상당한 차이가 있음을 알 수 있어, 국내 시방서를 적용할 경우 온도응력이 실제보다 적게 계산될 우려가 있는 것으로 사료되었다. 그림 9는 철도측 복부단면에 대한 해석치 온도구배를 4시간 간격으로 추출하여 하루동안의 온도구배 변화과정을 도시한 것으로, 29일 오후 4시에 단면 최대 온도차가 발생하는 것을 보여주고 있고, 30일 오전 4시에 단면 하부플랜지의 외면에 냉각이 발생하는 현상을 잘 보여주고 있다.

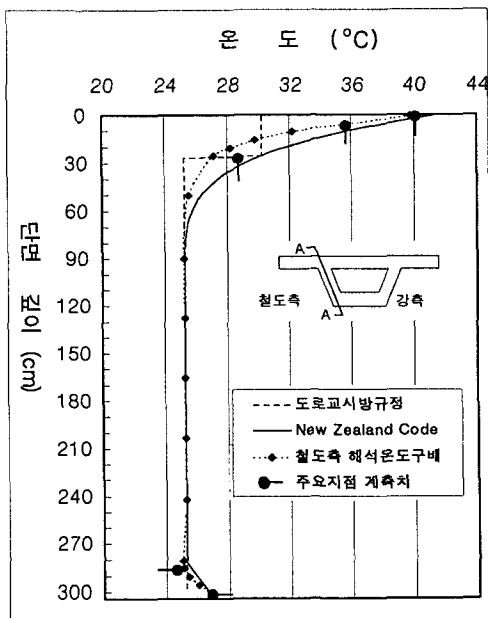


그림 8 온도구배 비교 (97. 6. 29 오후 4시)

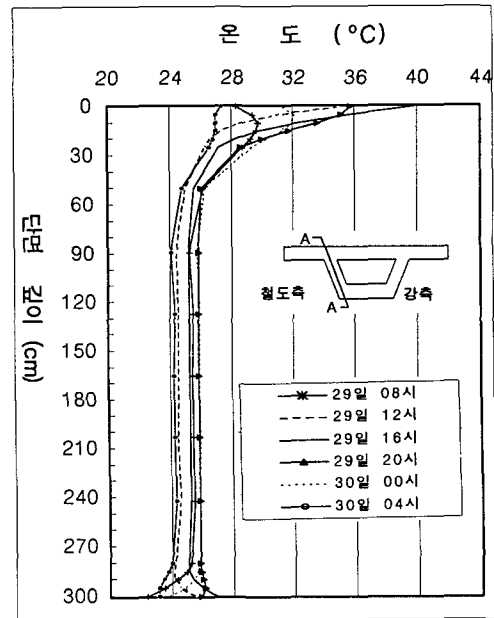


그림 9 시간에 따른 온도구배 변화도 (97. 6. 29 철도측 단면)

5. 온도응력 분석

5.1 자체평형 응력(self-equilibrating stress)

국내 도로교 시방서와 뉴질랜드 시방서에 규정된 온도구배로 발생하는 온도응력과 유한요소 해석치의 온도응력을 비교하기 위하여, 다음의 식을 이용하여 시방 온도구배에 대한 자체평형 응력(self-equilibrating stress)을 산정하였다.

$$\sigma_t(y) = E[\phi y + \epsilon_{ave} - \alpha T(y)] \quad (1)$$

여기에서, $\sigma_t(y)$ 는 단면 깊이에 따른 자체평형응력, ϕ 은 곡률, y 는 중립축에서의 수직거리, ϵ_{ave} 는 단면의

평균변형율, α 는 온도팽창계수, $T(y)$ 는 단면 깊이에 따른 온도구배곡선을 나타낸다. 식(1)은 Priestley의 가정을 통해 유도된 것으로 다음과 같은 가정을 하고 있다.^{[6][7]}

1. 평면 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 Euler-Bernoulli 가정은 유효하다.
2. 온도는 깊이에 대하여 변화하며, 같은 깊이에 대한 교량의 모든 지점의 온도는 동일하다.
3. 재료의 물성치는 온도에 의하여 변화하지 않는다.
4. 온도응력은 다른 하중조건에 의한 응력과 독립적으로 고려할 수 있다.

여기서, ϕ 는 곡률이고, ϵ_{ave} 는 단면의 평균변화율, $b(y)$ 는 단면깊이에 따른 단면폭의 함수, A 는 단면적으로써, 다음 식과 같이 표시된다.

$$\phi = \frac{\alpha}{I} \int T(y) \cdot b(y) \cdot y \cdot dy \quad (2)$$

$$\epsilon_{ave} = \frac{\alpha}{A} \int T(y) \cdot b(y) \cdot dy \quad (3)$$

5.3 연속구조 응력 (continuity stress)

온도구배를 발생하는 보의 곡률은 식(2)로 표현되었다. 단순지지인 경우 이러한 균일곡률이 발생하게되나, 보가 연속인 경우 이 온도구배로 인한 곡률은 중간지점에서 구속되고 부정정 반력과 휨모멘트가 발생하게되어, 내력에 의한 연속구조 응력(continuity stress)이 만들어진다. 연속보에서 온도구배로 인한 전체 온도응력은 단면내의 자체 평형응력과 연속구조 응력을 합해야 한다. 예를 들어, 2경간 연속보의 경우 지점구속에 의한 연속구조응력을 발생시키는 반력과 모멘트는 그림 10과 같다. 연속 상자형 교량 단면에서 자체평형응력과 연속구조응력을 합한 전체 온도응력은 그림 11과 같다.

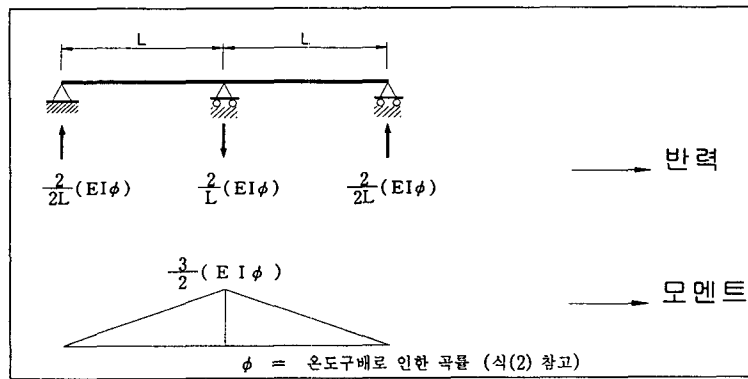


그림 10 지점구속에 의한 2경간 연속보의 발생내력

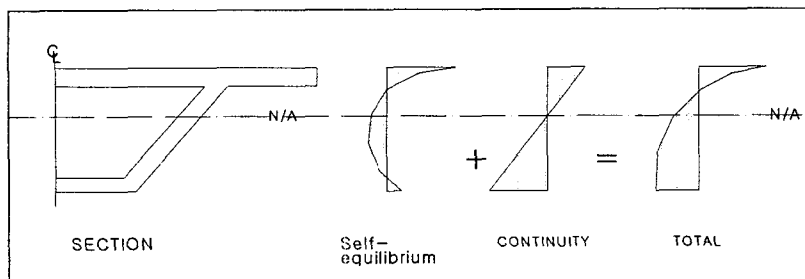


그림 11 연속 경간 교량의 온도응력 분포

5.3 단면 온도분포 분석

그림 12의 (a)는 단면 최대온도차가 발생하는 1997년 6월 29일 오후 4시에 계산된 단면에 발생하는 자체 평형응력의 분포를 보여주고 있다. 북부판에서 해석치의 최대인장응력은 상부판 플랜지하단과 중립축 사이에서 18.68kg/cm^2 이고, New Zealand 시방규정에 의한 최대인장응력은 22.7kg/cm^2 으로 계산되었고, 국내 도로교 시방규정에 의한 최대인장응력은 상부판 밑면에서 14.9kg/cm^2 로 계산되었다. 이와 같은 사실은 국내 도로교 시방서의 온도구배로 계산된 온도응력은 실제보다 적게 계산되나 New Zealand 시방규정에 의해 산출된 온도응력은 실제보다 안전측으로 계산되고 있음을 알 수 있었다.

그림 12의 (b)는 단면의 자체평형응력에 제 2경간 중앙지점에서 연속구조응력을 합한 전체온도응력을 보여주고 있다. 연속구조응력의 영향으로 인하여 단면하부에 최대인장응력이 발생하는 것을 알 수 있었으며, New Zealand 시방규정에 의한 최대인장응력은 23.5kg/cm^2 로써 해석치에 의한 최대인장응력 18.8kg/cm^2 에 대하여 안전치에 드는 응력분포를 보이고, 국내 도로교 시방규정에 의한 온도하중은 11.9kg/cm^2 로 도로교 시방서 온도구배 기준을 적용할 경우 실제보다 온도응력이 적게 계산될 수 있음을 확인하였다. 본 논문의 보다 자세한 연구결과는 참고문헌[8]을 참조하기 바란다.

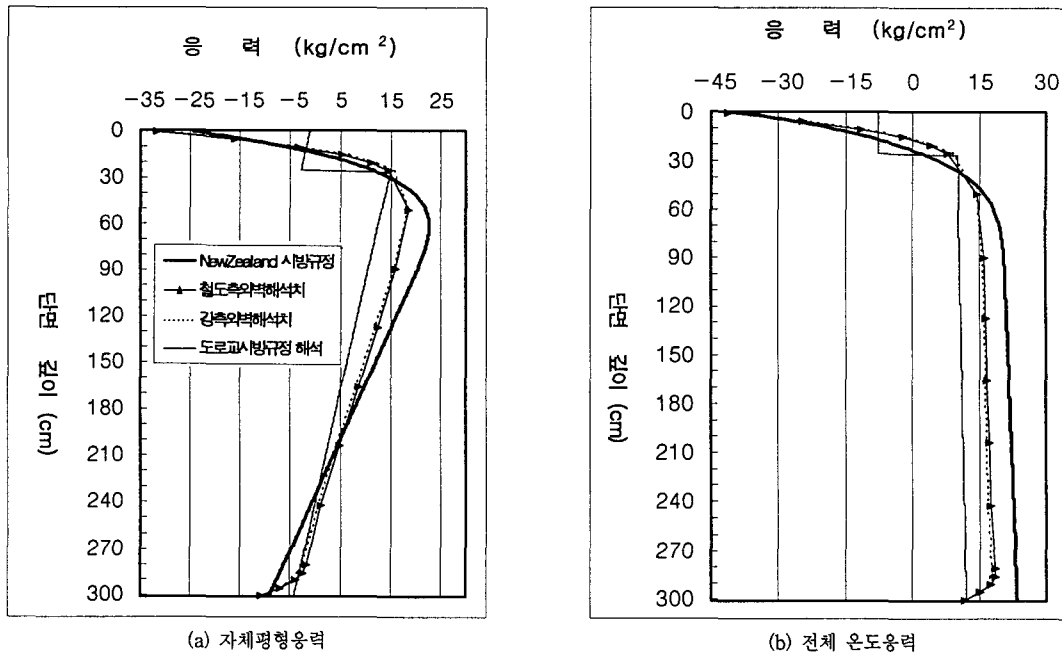


그림 12 해석 온도응력비교

6. 결 론

본 연구에서는 P.C. 상자형 교량으로 건설된 서울시 강변도시고속도로 일부구간인 두모교의 단면온도변화를 1997년 1월부터 7월까지 현장계측하고 온도해석을 통해 단면온도구배와 온도응력 분포상태를 국내 도로교 시방규정 및 New Zealand 시방규정에 의한 값들과 비교분석하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 현장계측 결과 포장면이 교량 상부단면의 온도구배에 미치는 단열효과로 인하여 단면 최대온도차가 감소하고, 발생시간이 1시간 정도 지연되는 현상을 관찰할 수 있었다. 포장이 끝난 하절기에는 16°C 정도의 단면 최대온도차가 자주 발생하는 것을 알 수 있었다.

2. 하절기 중에 1997년 6월 29일의 환경인자, 계측 대기온도, 기상청자료를 이용한 일사량과 평균풍속 등의 자료를 입력하여 FETAB으로 계산한 해석치를 비교분석 한 결과 단면 최대온도차는 오후 4시에 나타났다. 단면 주요지점의 계측온도와 해석치온도가 일치하였고, 단면 최대온도차에 대하여 해석치는 14.6℃로, 계측치 15.5℃와 비교해 볼 때 서로 근접한 값으로 계산되어, 해석치가 교량의 실제 온도거동을 적절히 반영해 주는 것으로 확인되었다. 따라서 단면의 해석 온도구배 역시 유효한 것으로 평가되었다.
3. 단면 최대온도차를 발생시키는 오후 4시의 해석치의 온도구배를 국내 도로교 시방규정 및 New Zealand 시방규정의 온도구배와 비교분석 해본 결과 New Zealand 시방규정의 온도구배는 해석치와 근사하게 나타났으며, 국내 도로교 시방서의 온도구배는 해석치와 비교하여 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다.
4. 단면 최대온도차가 발생하는 1997년 6월 29일 오후 4시에 계산된, 단면에 분포하는 자체평형응력은 해석치에 의한 최대인장응력이 상부판 플랜지 하단과 중립축 사이에서 18.68kg/cm²이고, New Zealand 시방규정에 의한 최대인장응력은 22.7kg/cm²으로 계산되었으며, 국내 도로교 시방규정에 의한 최대 인장응력은 상부판 밑면에서 14.9kg/cm²로 계산되었다. 이와 같은 사실로부터 국내 도로교 시방서의 온도구배로 계산된 온도응력은 실제보다 적게 계산되나, New Zealand 시방규정에 의한 온도응력은 실제보다 안전측으로 계산되고 있음을 알 수 있었다.
5. 전체온도응력은 연속구조응력의 영향으로 인하여 단면하부에 최대인장응력이 발생하는 것을 알 수 있었으며, New Zealand 시방규정에 의한 최대인장응력은 23.5kg/cm²로써 해석치에 의한 최대인장응력 18.8kg/cm²에 대하여 안전치에 드는 응력분포를 보이고, 도로교 시방규정에 의한 온도하중은 11.9kg/cm²로 도로교 시방서 온도구배 기준을 적용할 경우에 실제보다 온도응력이 적게 계산될 수 있음을 확인하였다.

7. 감사의글

본 연구는 일부 서울시의 연구지원으로 수행되었음을 밝히며 연구지원에 감사드립니다.

8. 참고 문헌

1. 대한토목학회, "도로교 표준시방서", 1996.
2. M. Ramezankhani, and P. Waldron, "Segmental Construction of Bridges: Differential Temperature Effects in The Cogan Spur Viaduct," Univ. of Bristol, Department of Civil Engineering, Report No. UBCE/C/91/10, November 1991.
3. Elbadry, M. M., and Ghali, A., "User's Manual and Computer Program FETAB: Finite Element Thermal Analysis of Bridges," Research Report No. CE82-10, Department of Civil Engineering, University of Calgary, Oct. 1982.
4. Elbadry, M. M., and Ghali, A., "Nonlinear Temperature Distribution and It's Effects on Bridges," IABSE PERIODICA, May 1983, 169pp.
5. D. S. Prakash, Rao, "Temperature Distribution and Stresses in Concrete Bridges," ACI Journal, Title No. 83-52, July-August 1986, pp588.
6. P. C. Hoffman, R. M. McClure, H. H. West, "Temperature Study of an Experimental Segmental Concrete Bridge," Prestressed Concrete Institute Journal, vol. 28, No.2, 1983, pp.78-97.
7. M. J. N. Priestley, "Design of Concrete Bridges for Temperature Gradients," Journal of the American Concrete Institute, vol. 75, No.5, May 1978, pp. 209-217.
8. 손기훈, "P.C 상자형 교량의 온도영향분석", 국민대학교 석사학위논문, 1998. 7.