

마찰계수와 재료강도를 고려한 PSC 박스 거더교의 최적설계

The Optimum Design for PSC Box Girder Bridges Considering Friction Coefficient and Material Strength

김기욱¹⁾

Kim, Ki Wook

요약 : 본 연구는 FSM 공법의 PSC 박스 거더교를 최소경비로 자동 설계하는 최적설계 프로그램을 이용하여 곡률마찰계수와 파상마찰계수 및 콘크리트, 철근, 긴장재의 강도증진이 최적설계에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과를 바탕으로 마찰계수에 대한 적절한 긴장재의 종류를 찾아내고 향후 긴장재의 연구 개발 방향을 제시하였으며, 사용되는 재료의 강도증진에 대한 연구방향을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다. 사용된 최적설계 프로그램은 축차 무제약 최소화 기법을 이용하였고, 설계과정에서 설계점들이 설계가능 영역밖에 있는 것을 허용할 수 있도록 Kavlie가 제안한 확장 벌칙함수를 도입하였다. 또한 설계점들의 탐사 방법은 Powell's direct search method를 사용하며, 설계시간을 단축시키기 위해 설계점 변화에 따른 단면력 변화를 Gradient를 이용하여 근사화 시키는 방법을 사용하였다.

ABSTRACT : This study analyzes the effects of the curvature friction coefficient, the wobble friction coefficient, and the increased strength of concrete, reinforced tendon on optimum designs by using the optimum-design program, to minimize the cost of a PSC box girder bridge using the full staging method. The objective of this study is to find a proper tendon for the friction coefficient, and thereafter, to indicate the direction of the study development about tendons and to indicate the direction of a study on the increased strength of used materials. This program used the SUMT procedure and Kavlie's extended-penalty function to allow infeasible design points in the process. Powell's direct method was used in searching design points, and the gradient approximate method was used to reduce the design hours.

핵심용어 : 최적설계, 프리스트레스 박스거더, 축차무제약최소화기법, 마찰계수

KEYWORDS : Optimum design, PSC Box-girder, SUMT, Friction coefficient

1. 서론

PSC 박스 거더교를 설계할 때는 구조적 복잡성 때문에 지금까지 기술자의 경험에 의해 가정된 구조형식 및 부재치수를 기초로 하여 설계조건과 시방서의 설계허용한계를 만족하는 몇 개의 구조를 설계한 후 그 중에서 비용이 가장 적게 드는 것을 골라 최종설계로 채택하고 있다. 설계조건을 만족하는 허용설계의 종류는 무수히 많이 존재하기 때문에 그 중에서 비용이 싼 것을 선택한다는 것은 기술자의 경험에 따를 수밖에 없고 이렇게 결정된 결과가 최적이라는 보장이 없다. 따라서 시방서의 규정을 만족시키면서 구조물 경비를 최소화 할 수 있는 자동화된 최적설계가 말로 설계의 효율성과 경제성의 향상을 위해 유용하다(김기욱 등, 2004)고 할 수 있으나, 최적화기법을

이용한 실 구조물의 PSC 박스 거더교 최적설계에 관한 연구와 설계가 미진한 것이 현실이다.

한편 현재까지 건설재료에 대해서는 많은 연구가 활발히 수행되어 강도, 내구성 및 기타 구조해석에 영향을 미치는 요소들의 성능이 과거에 비해 놀랍도록 개선되었다. 이러한 여러 사항들을 반영하기 위하여 본 연구에서는 PSC 박스 거더교의 자동 최적설계 프로그램을 개발(김기욱 등, 2004)하고 이를 이용하여 콘크리트, 철근 및 긴장재의 성능개선 중 강도부분이 최적설계에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 그리고 국내외 여러 시방서에서는 설계자가 선택하는 긴장재의 종류에 따라 각기 다른 곡률마찰계수와 파상마찰계수를 사용하게 되어 있으므로 이러한 마찰계수가 PSC 박스 거더교의 최적설계에 미치는 영향을 분석하여 적절한 긴장재의 종류 및 향후 긴장재의

1) 교신저자, 정회원, Post-Doc, The Ohio-state University, 공학박사
(E-mail : ce5@korea.com 1-614-688-9033)

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

연구 개발 방향을 제시하는데 본 연구의 목적이 있다.

연구방법으로는 개발된 PSC 박스 거더교의 자동 최적설계 프로그램을 사용하여 마찰계수 및 각 재료들의 강도를 변화시켜가며 적용하는 방법을 택하였다. 프로그램에 의해 자동 반복되어지는 구조해석 및 최적설계 과정을 통해 최종적인 최적비용을 산출하게 되고, 이를 서로 비교함으로써 마찰계수와 각 재료들의 성능향상이 최적설계에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 구조해석 및 최적설계

최적설계 프로그램은 고정하중, 활하중, 프리스트레스에 의한 단면력을 자동으로 계산하고, 설계자가 원하는 검사위치에서 검사가 이루어 질 수 있도록 작성하고, 최적설계시 축차 무제한 최소화 기법(박문호 등 1991, Arora 1989)을 이용하며, 설계과정에서 설계점들이 설계가능 영역밖에 있더라도 허용할 수 있도록 확장 벌칙함수를 도입하였다. 설계점들의 탐사 방법은 Powell's direct search method(박문호 등 1991, Arora 1989)를 사용하며, 설계시간을 단축시키기 위해 설계점 변화에 따른 단면력 변화를 Gradient(박문호 등 1991, Arora 1989)를 이용하여 근사화 시키는 방법을 사용하였다.

2.1 물리매개변수

설계 문제를 정식화하는 첫번째 단계는 물리매개변수를 설정하는 것이다.

본 연구에서는 고정 매개변수로 경간수, Cell의 수, 상부플랜지의 폭, 바닥플랜지의 폭, 경간장, 콘크리트·긴장재·철근의 물성치를 두었고, 변동 물리매개변수로는 긴장재의 긴장력, 거더높이, 모든 웹들의 통합 두께, 긴장재 편심, 상부플랜지 두께, 하부플랜지 두께 등을 두었으며, 종속 물리매개변수로는 각 경간별 지점·중앙점·경간 1/4지점에서의 전단 철근량, Cable의 전체 수, 각 웹에서의 Cable수, 부(-)의 극한모멘트 부분 보강 철근량 등을 두었다.

2.2 구조계산 및 단면설계

주어진 변동 물리매개변수로 인한 거더의 거동평가에 대한 계산은 크게 구조해석과 단면설계의 두 부분으로 나누어 수행하였다.

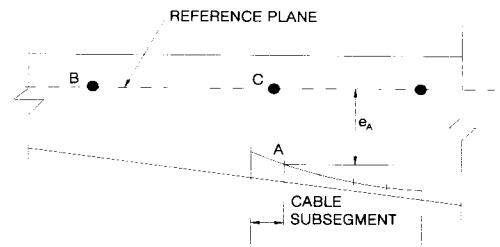
2.2.1 구조해석 부분

거더에 작용하는 고정하중, 활하중, 프리스트레스트력의 영향을 받는 모든 검토단면에서의 모멘트와 전단력을 계산하는 부

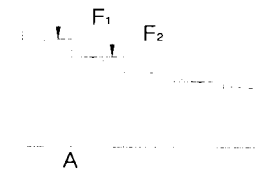
분으로, 절차는 다음과 같이 크게 네 부분으로 구성하였다.

- 1) 구조물 강성 행렬의 정식화
- 2) 프리스트레싱 영향의 계산
- 3) 고정하중 영향의 계산
- 4) 활하중 영향의 계산

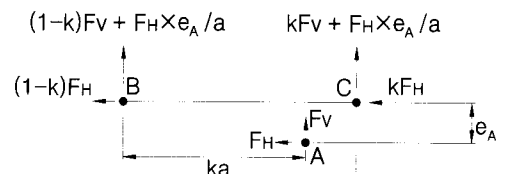
여기서, 1)과정인 구조물 강성 행렬(허택녕, 1994)은 변위법을 사용하여 구하였다. 변위법에서는 적합조건, 힘-변형관계식, 그리고 평형조건을 구조물에 적용시켜서 각각 적합 매트릭스 [B], 부재 요소의 강성 매트릭스 [S], 그리고 평형매트릭스 [A]를 형성한다. 다음에는 가상일의 원리를 적용해서 $[B]=[A]^T$ 임을 확인한 후 국부 구조물 강성매트릭스 $[k]=[A][S][A]^T$ 를 구하는 방법이다.



(a) 거더에서 Cable 위치



(b) 세그먼트 분할에 의한 긴장력 가정



(c) 절점에서의 등가하중

그림 1. 거더에 작용하는 프리스트레스트력

2)과정인 거더에 작용하는 긴장력은 그림 1과 같이 고려하였다. 그림 1(a)과 같이 긴장재를 곡선 세그먼트로 분할하여 세그먼트 내에서는 긴장력이 일정하고 긴장재에 의해 거더에 전달되는 하중은 각 세그먼트 절점에서만 작용한다고 가정한다. 물론 실제로는 분포하중의 개념이므로 실제와는 오차가 있으나 무시할 수 있을 정도이고, 이러한 가정을 함으로써 텐던이 거더에 미치는 영향을 간편하게 고려할 수 있다.

긴장재 세그먼트 절점은 일반적으로 거더 구조해석을 위한 요소절점과 일치하지 않으므로 그림 1(c)과 같이 요소의 절점

하중으로 치환하여 구조해석을 시행한다.

또한 2), 3), 4)의 모든 과정은 단면제원이 변함에 따라 민감하게 변화되므로 Gradient를 이용하여 설계점 변화에 따른 프리스트레스의 영향을 근사화 시켜 구조해석을 수행하였다.

2.2.2 단면설계 부분

단면설계 부분은 해석에서 얻은 모멘트와 전단력의 값으로, 지정된 단면에서 휨 응력, 전단 강도, 극한 모멘트 검토 등이 수행되며, 동시에 모든 종속 물리매개변수의 값이 계산된다.

2.3 최적설계

본 연구에서 수행한 프로그램의 알고리즘은 그림 2와 같으며, 구조해석시 횡방향 설계와 종방향 설계를 모두 고려하도록 하였으며, 구조해석과 최적설계가 동시에 이루어지도록 하였다.

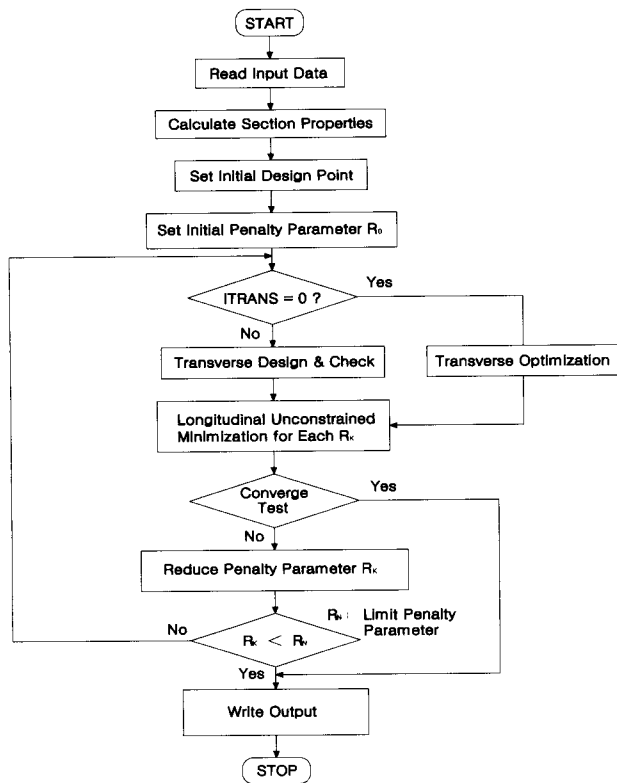


그림 2. 프로그램 알고리즘

설계 관련규정은 AASHTO Standard 2002(AASHTO, 2002)를 근거로 하였으며, 최적화 기법은 시방서상의 많은 제약조건을 간편하게 취급할 수 있는 SUMT(박문호 등 1991, Arora 1989)기법을 사용하였다. 축차 무제약 최소화 기법(SUMT)은 설계변수와 많은 제약조건을 갖는 비선형 최적화 문제를 일련의 벌칙 매개변수(Penalty Function)들을 사용

하여 무제약 최소화 문제로 변형시켜 축차적으로 최적해를 찾아가는 방법이다. 이 변형은 일련의 벌칙함수를 최소화되어야 될 목적함수에 더하여 목적함수를 확대하는 것인데, 벌칙함수는 제약조건함수로부터 구성되며, 본 연구에서는 SUMT기법 중에서도 PSC 박스 거더교에 가장 효율성과 신뢰도가 높다고 알려진 Direct Search Method(박문호 등 1991) 중의 한가지 방법인 Powell's Method(박문호 등 1991)를 사용하였다.

2.3.1 확장 벌칙함수와 목적함수

식(2)와 같이 Kavlie가 제안한 확장 벌칙함수(Kavlie, 1970)를 도입함으로써 초기 설계점과 순차적인 설계점이 설계 가능 영역에 위치해 있지 않더라도 무제약 목적함수의 최소화 과정을 통해 설계가능 영역으로 전이시켜 최적해를 구할 수 있도록 하였다.

$$\begin{aligned} & \Sigma Y_k / g_j(x) && \text{for } g_j(x) \geq \epsilon \\ & \Sigma Y_k (2\epsilon - g_j(x)) / \epsilon^2 && \text{for } g_j(x) < \epsilon \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, Y_k 는 벌칙 매개변수이고, $g_j(x)$ 는 제약 조건함수이다. 그리고, $\epsilon = Y_k / \delta$ 이고, δ 는 2개의 벌칙함수항 사이의 전이를 결정하는 상수이다.

목적함수로 비용함수를 선택하였으며, 거더의 총비용은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f(x) &= COST_c + COST_s + COST_p \\ &= U_c \times V_c + U_s \times W_s + U_p \times W_p \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $COST_c$, $COST_s$, $COST_p$ 는 콘크리트, 철근, PS강재의 총비용이고 U_c , U_s , U_p 는 콘크리트, 철근, PS강재의 단가이며, V_c , W_s , W_p 는 콘크리트 체적, 철근 및 PS강재의 중량이다.

2.3.2 제약조건

본 연구에서는 100여개 이상(김기욱, 2002)의 다음과 같은 거동 제약조건과 설계 제약조건이 사용되었다.

(1) 거동 제약조건

설계 검토가 수행되는 임의 위치에서의 거동에 사용되는 매개변수들로는 프리스트레스 도입시 콘크리트 상·하연단 응력, 사용하중 상태에서의 콘크리트 상·하연단 응력, 전단 강도, 극한 모멘트 강도, 처짐 등을 두었고, 다음의 거동 제약조건을

만족하여야 한다.

- (1) 하중단계별 콘크리트 상·하연단 휨응력 \leq 허용 휨응력
- (2) 소요 전단강도 \leq 설계 전단강도
- (3) 소요 휨모멘트 강도 \leq 설계 휨모멘트 강도
- (4) 처짐 \leq 허용처짐

(2) 설계 제약조건

주로 기하학적 단면형상에 관한 사항으로 실제 설계문제에 대한 적합성 확보를 위해 독립변수에 가해지는 제약조건으로서 각 경간별 상·하부 플랜지 두께, 텐던 편심, 복부 두께, 텐던 긴장력, 공칭 거더 높이 등을 매개변수로 사용하여 설계 제약 조건식을 구성하였다.

- (1) 설계 매개변수 \leq 최대 허용규정
- (2) 설계 매개변수 \geq 최소 허용규정

3. 설계변수 및 설계조건

3.1 설계변수

그림 3 및 그림 4와 같이 횡단면과 종단면 설계변수를 두었다.

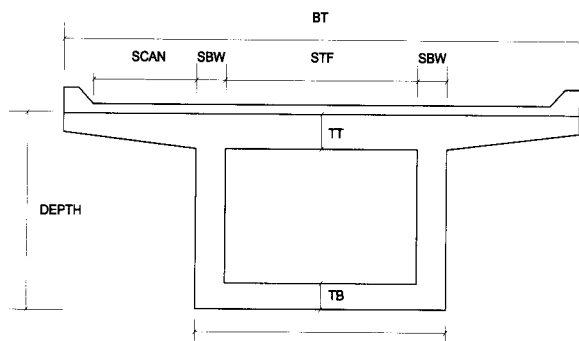


그림 3. 횡단면 설계변수

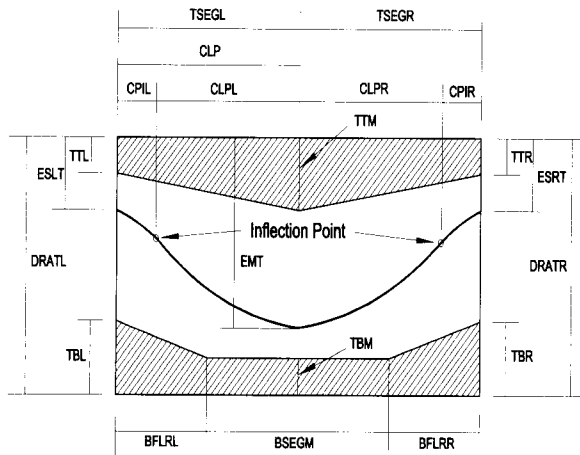


그림 4. 종단면 설계변수

그림 4에서 TTL·TTM·TTR은 상부플랜지의 좌측단·중앙부·우측단 두께이고, ESLT·EMT·ESRT는 긴장재의 좌측단·중앙부·우측단의 편심거리이며, 기타 설계변수에 대해서는 참고문헌(김기욱, 2002)에 자세히 기술되어 있다.

3.2 설계조건

미국 캘리포니아에 있는 지간장 162'와 150'인 2경간 연속 PSC 박스 거더교를 예제로 적용하였으며, 사용된 설계조건은 다음과 같다.

- 1) 경간장 : 312 ft(150ft+162ft)
- 2) 교 폭 : 2차선 교량
- 3) 횡단면 셀(cell)수 : 3셀
- 4) 활하중 : HS-20 차량 및 차선하중
- 5) 긴장재

인장강도 (f'_s) : 1,894.44 MPa(=270 ksi)

허용인장응력 :

인장시 :

$$0.75 (f'_s) = 1,420.83 \text{ MPa}(=202.5 \text{ ksi})$$

정착후 :

$$0.7 (f'_s) = 1,326.11 \text{ MPa}(=189 \text{ ksi})$$

설계하중 작용시 :

$$0.6 (f'_s) = 1,137 \text{ MPa}(=162 \text{ ksi})$$

단위중량 : 0.784 tonf/m³(=0.283 pci)

덕트 직경 : 7.62 cm(=3 in)

강재 단면적 : 0.987 cm²(=1.824 in²)

탄성계수 : 2.0 × 10⁵ MPa(=27000 ksi)

곡률마찰계수 : 0.25/rad

파상마찰계수 : 0.0007/m(=0.0002/ft)

Anchor set : 1.5875 cm(=0.625 in)

6) 철근 항복강도 : 420 MPa(=60 ksi)

7) 콘크리트

설계기준강도 : (f'_c) = 35 MPa(=5 ksi)

초기압축강도 : (f'_{ci}) = 24.5 MPa(=3.5 ksi)

초기허용압축응력 :

$$0.55 (f'_{ci}) = 13.5 \text{ MPa}(=1.925 \text{ ksi})$$

초기허용인장응력 :

$$3.0 \sqrt{f'_{ci}} = 1.242 \text{ MPa}(=0.177 \text{ ksi})$$

허용압축응력 : 0.4 (f'_c) = 14 MPa(=2 ksi)

허용인장응력 : 0 ksi

탄성계수 : 24,556 MPa(=3500 ksi)

크리프계수 : 2.5

크리프손실 : 175 MPa (=25 ksi)

단위중량 : 2.4 tonf/m³ (=150 pcf)

8) 단가 : 국내·외의 문헌과 물가자료(편집부편, 2004)를 종합한 단가를 가정하여 적용하였으며, 재료경비에는 인건비가 포함되어 있으며, 1\$를 1,200원으로 계산하였다.

긴장재 : 1,719,577원/tonf (=60 cents/lb)

철근 : 529,101원/tonf (=20 cents/lb)

콘크리트 : 172,642 원/m³ (=110 \$/cu.yd)

4. 적용 및 결과고찰

4.1 마찰계수를 고려한 최적설계

본 연구에서 적용한 긴장재의 마찰에 의한 손실은 식 (4)와 같다.

$$T_0 = T_x e^{(\mu\alpha + KL)} \quad (4)$$

여기서,

T_x : 설계단면에서의 긴장재 인장력

T_0 : 정착단에서의 긴장재 인장력

μ : 각변화 1 radian에 대한 곡률 마찰계수

α : 각변화 (radian)

K : 긴장재 길이 1 ft 에 대한 파상 마찰계수

L : 정착단으로부터 설계단면까지 길이 (ft) 이다.

표 1은 파상마찰계수와 곡률마찰계수의 AASHTO 시방규정이고 표 2는 국내의 시방규정(도로교 및 철도교 설계기준)으로 미국의 AASHTO 시방규정과 단위만 다를 뿐 근본적인 값은 동일하다는 것을 알 수 있다.

표 1과 표 2에서와 같이 시방서에는 설계자가 선택하는 긴장재의 종류에 따라 각기 다른 곡률마찰계수와 파상마찰계수를 사용한다. 그래서 본 연구에서는 이러한 마찰계수가 PSC 박스 거더교의 최적설계에 미치는 영향을 분석하여 적절한 덕트의 종류 및 향후 연구방향을 모색해 보고자 마찰계수의 값에 따라서 표3과 같이 Type-A에서 Type-G까지 분류하여 최적설계를 수행하였다. 그리고 4.2절부터는 아연 도금된 강성덕트 (Type-E를 사용하는 것으로 보고 파상마찰계수를 0.0002/ft, 곡률마찰계수를 0.25/radian의 값을 사용하였다.

표 1. 파상마찰계수(K)와 곡률마찰계수(μ) : AASHTO시방규정

Type of steel	Type of duct	K(/ft)	μ (/rad)
Wire or ungalvanized strand	Bright metal sheathing	0.002	0.3
	Galvanized metal sheathing	0.0015	0.25
	Greased or asphalt-coated and wrapped	0.002	0.3
	Galvanized rigid	0.0002	0.25
High-strength bars	Bright metal sheathing	0.0003	0.2
	Galvanized sheathing	0.0002	0.15

표 2. 파상마찰계수(K)와 곡률마찰계수(μ) : 도로교 시방규정

Type of steel	덕트의 종류	K(/m)	μ (/rad)
PS 강선 및 강연선	금속 쉬스	0.0066	0.3
	아연도금 금속 쉬스	0.005	0.25
	그리스 또는 아스팔트로 코팅하고 또 피복된 것	0.0066	0.3
	아연도금된 강성덕트	0.0007	0.25
PS 강봉	금속 쉬스	0.001	0.2
	아연도금 금속 쉬스	0.0007	0.15

그림 5에서 그림 7은 표3의 최적결과 중에서 파상마찰계수 (K)와 곡률마찰계수(μ) 값에 따른 최적비용, 긴장력, 및 공칭 거더 높이를 그래프로 나타낸 것이다. 그림5와 표3에서 긴장재로 PS강연선의 아연도금 된 강성덕트(Type-E)를 사용하면, 국내에서 주로 사용하고 있는 PS 강연선의 아연도금 금속쉬스 (Type-C)를 사용한 경우보다 최적 비용면에서 5.27%의 효과가 있는 것으로 나타났으며, PS 강연선의 금속쉬스나 그리스 또는 아스팔트로 코팅하고 또 피복된 덕트(Type-D)보다는 8.69% 최적비용에서 효과가 있는 것으로 나타났다.

그리고 파상마찰계수와 곡률마찰계수가 최적설계에 미치는 영향을 좀더 알아보기 위하여 본 연구에서 가상의 덕트를 Type-A와 Type-B로 가정하여 별도로 추가하였는데, Type-A는 Type-D와 비교하면 파상마찰계수만 차이가 나는 것으로 최적비용면에서 Type-D보다 8.67%정도 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 Type-B는 마찰계수가 전혀 없는 가장 이상적인 가상덕트이지만 Type-E와 비교하면 1% 미만의 최적비용 효과만이 나타났다. 여기서, Type-A, Type-B, Type-E, Type-F, Type-G에 대한 최적설계값이 대동소이한 이유는 파상마찰계수가 0.0003~0.0002(/ft)의 범위의 값을 가지고, Type-C, Type-D의 파상마찰계수 보다는 10분의 1 정도 작기 때문인 것으로 생각된다.

그러므로 마찰계수 중에서 곡률마찰계수보다는 파상마찰계수가 최적설계에 영향을 많이 미치는 인자로 판명되었으므로, 재

표 3. 파상마찰계수(K)와 곡률마찰계수(μ)에 따른 data분류 및 최적설계결과

Type of steel	분류	덕트의 종류	K(/m)	K(/ft)	μ (/rad)	최적비용 (*천원)	긴장력 (tonf)	거더높이 (m)	비율(%) (최적비용)
가상 덕트	Type-A	가상 덕트 1	0.0007	0.0002	0.30	132,068	3,693	1.839	100.02
	Type-B	가상 덕트 2	0.0000	0.0000	0.00	130,798	3,519	1.842	99.06
PS 강선 및 강연선	Type-C	아연도금 금속 쉬스	0.0050	0.0015	0.25	139,001	4,315	1.898	105.27
	Type-D	금속 쉬스	0.0066	0.0020	0.30	143,513	4,617	1.963	108.69
		그리스 또는 아스팔트로 코팅하고 또 피복된 것	0.0066	0.0020	0.30				
Type-E	아연도금된 강성덕트	0.0007	0.0002	0.25	131,549	3,668	1.842	100.00	
ps 강봉	Type-F	금속 쉬스	0.0010	0.0003	0.20	132,146	3,706	1.837	100.08
	Type-G	아연도금 금속 쉬스	0.0007	0.0002	0.15	131,779	3,655	1.837	99.80

료개발에 대한 연구의 방향도 파상마찰계수를 줄이는 쪽으로 (예를들어 Type-C, Type-D의 제품의 파상마찰계수의 값을 0.0003~0.0002(/ft) 범위 안으로 들도록) 개발하고 설계자에게는 시방규정에 제시된 제품 중에서 파상마찰계수가 작은 제품을 사용하도록 권장한다.

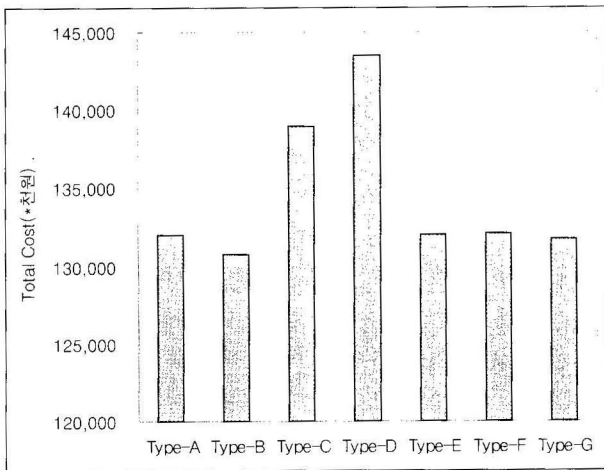


그림 5. 마찰계수 값에 따른 최적설계 : 비용 산출

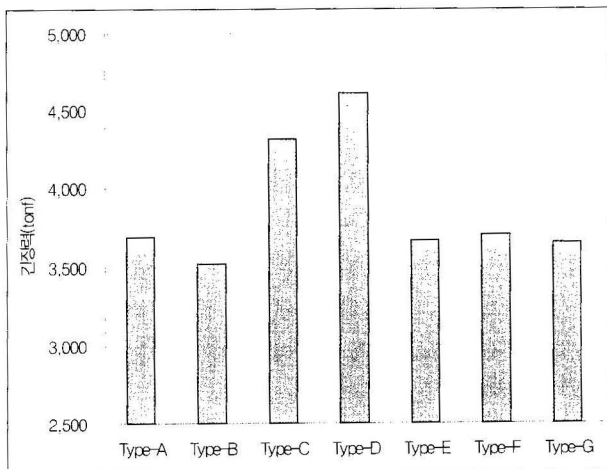


그림 6. 마찰계수 값에 따른 최적설계 : 긴장력 산출

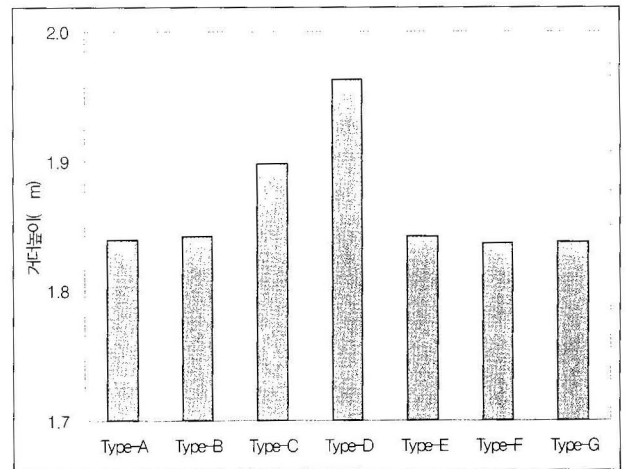


그림 7. 마찰계수 값에 따른 최적설계 : 공칭 거더 높이 산출

또한 그림 5에서 그림7의 마찰계수 값에 따른 최적설계 비용, 긴장력 및 공칭 거더 높이에 대한 그래프를 비교해보면 서로 비슷한 형상으로 나타난다. 여기서 긴장재의 마찰계수가 변화함에 따라 긴장력이 변화하게 되고, 이러한 긴장력의 변화가 공칭 거더 높이에 영향을 미치고 나아가 최적비용을 변화시키는 메카니즘 즉, 마찰계수와 긴장력, 공칭 거더 높이 및 최적비용 사이에 일련의 상관관계가 있음을 알 수 있다.

4.2 재료강도를 고려한 최적설계

PSC의 구성 재료인 콘크리트와 철근, 그리고 긴장재의 성능 향상 중 강도부분이 최적설계에 미치는 영향을 검토하였다.

4.2.1 콘크리트 강도에 따른 최적비용의 상관관계

콘크리트 강도 변화에 따른 PSC 박스 거더교 최적설계 비용의 상관관계를 알아보기 위하여 콘크리트 강도를 10%씩 증가시켜 최적설계를 수행하였다.

표 4는 물가 자료(편집부편, 2004)에 의한 현재 레미콘공장

에서 생산되는 규격별 단가표이다. 이를 그래프로 도시하면 그림 8과 같으며, 추세선 분석하면 정확한 2차식의 포물선으로 표현되지만 콘크리트 강도 40 MPa 이상에서는 이 추세선을 이용하면 안 된다. 왜냐하면 80 MPa 강도를 추세선으로 구한 공식에 넣어 산출하면 현실적으로 불가능한 엄청난 비용(1억 8천만원/m³)이 산출되기 때문이다. 그리하여 본 연구에서는 콘크리트 강도 40 MPa 이상에 대해서는 정확한 물가자료를 구할 수 없고(편집부편, 2004), 재료의 강도가 최적설계에 미치는 영향만을 분석하기 위해서 규격별로 제품가격을 같다고 가정하고 최적설계를 수행하였다. 이렇게 수행한 결과 그림 8의 콘크리트 강도 변화에 따른 최적비용의 그래프를 산출하였다. 그림 9에 나타난 바와 같이 콘크리트 강도 증진이 전체 최적비용에는 0.5% 미만의 효과만이 나타났으며, 콘크리트 강도 증진이 PSC 박스 거더 교량의 최적설계에 의한 최적비용에는 별다른 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

표 4. 레미콘 규격별 단가표 (금액단위: 원/m³, 부가세별도)

콘크리트 강도 (MPa)	13.5	16	18	21	24	27	30	35	40
8	51300	52990	54900	57090	59290	61600	66050	71470	77400
10	51750	53550	55350	57750	60060	62370	66960	72270	78300
12	52090	53890	55800	58410	60830	63250	67870	72850	78880
15	52650	54680	56590	59510	61930	64460	69450	73910	80260
18	53250	55460	57380	60280	63030	65890	71040	75080	81280

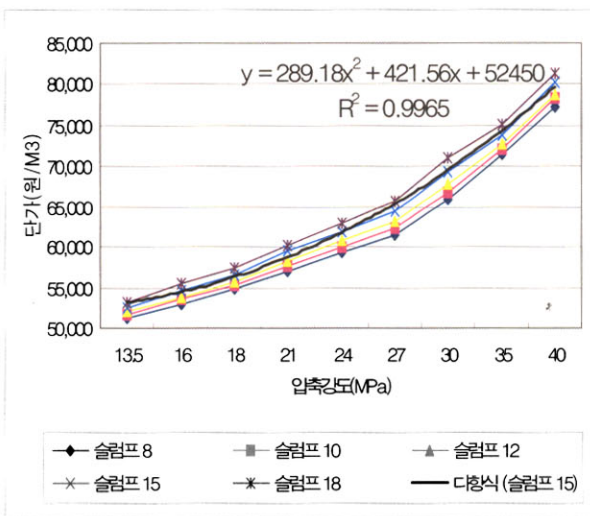


그림 8. 레미콘 규격별 비용

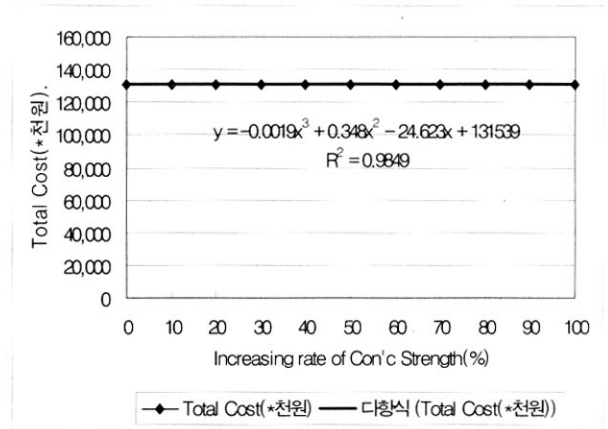


그림 9. 콘크리트강도 변화에 따른 최적비용의 상관관계

4.2.2 철근 강도에 따른 최적비용의 상관관계

철근 강도 변화에 따른 최적설계 비용의 상관관계를 알아보기 위하여 철근의 강도를 10%씩 증가시켜 최적설계를 수행하였다.

그림 10은 철근 강도 변화에 따른 최적비용을 그래프로 나타낸 것으로, 철근 강도 증진이 최적비용을 감소시키는 영향을 나타내었으나 전체비용에는 1% 이하의 효과만이 나타났다. 즉, 철근의 강도 증진이 PSC 박스 거더 교량의 최적설계에 의한 최적비용에는 별다른 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

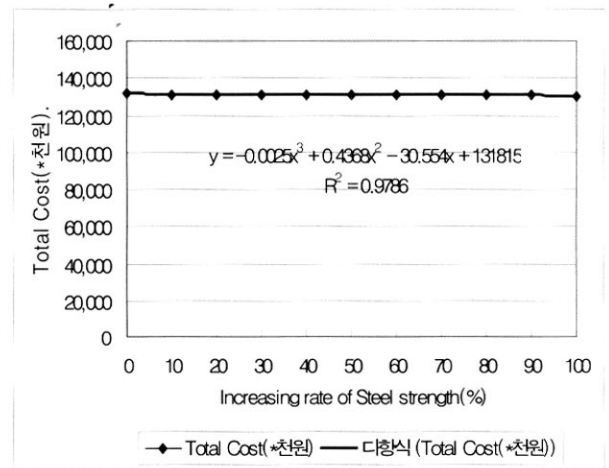


그림 10. 철근 강도 변화에 따른 최적비용의 상관관계

4.2.3 긴장재 강도에 따른 최적비용의 상관관계

긴장재 강도 변화에 따른 최적설계 비용의 상관관계를 알아보기 위하여 긴장재의 강도를 10%씩 증가시켜 최적설계를 수행하였다.

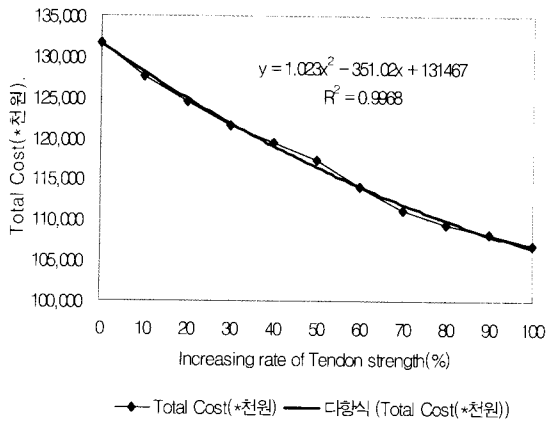


그림 11. 긴장재 강도 변화에 따른 최적비용의 상관관계

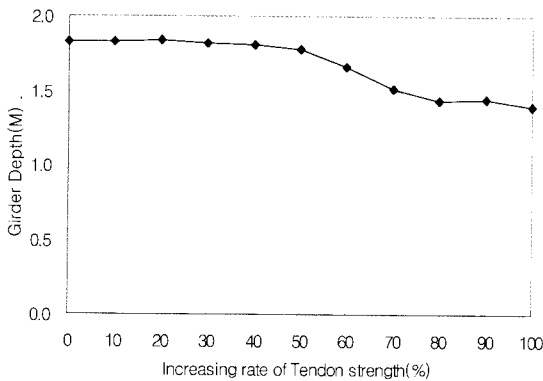


그림 12. 긴장재 강도 변화에 따른 공칭 거더 높이 산출

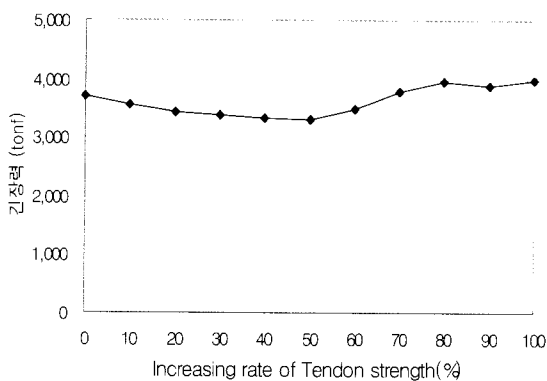


그림 13. 긴장재 강도 변화에 따른 긴장력 산출

그림 11에 나타난 바와 같이 긴장재 강도 증진이 최적비용에 2차식의 형태로 감소시키는 영향을 나타내었으며 긴장재의 강도가 2배 증가시 전체비용에 20%정도의 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

그림 12는 긴장재 강도 변화에 따른 공칭 거더 높이를 산출

한 그래프로 긴장재의 강도 증가에 따라 공칭 거더 높이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 13은 긴장재 강도 변화에 따른 긴장력을 산출한 그래프이며, 긴장력이 다소 감소하다가 점차적으로 증가하는 형태로서 긴장재의 강도 변화에 크게 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 그러므로 긴장재의 강도 증가에 따라 최적비용이 줄어드는 것은 공칭 거더 높이 감소 효과에 어느 정도 영향이 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 FSM 공법을 사용하는 PSC 박스 거더교의 상부구조를 축차 무제약 최적화 기법에 의해 최소경비로 설계할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 마찰계수와 구성재료 강도 변화가 최적설계에 미치는 영향을 검토하였다. 수행한 연구결과와 결과고찰을 통한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 긴장재의 마찰계수가 PSC 박스 거더교의 최적설계에 미치는 영향은 긴장재의 종류에 따라 다소 다르나 비교적 큰 것으로 검토되었다. 긴장재로 PS강연선의 아연도금 강성덕트(Type-E)를 사용하면, 국내에서 주로 사용하고 있는 PS 강연선의 아연도금 금속쉬스(Type-C)를 사용한 경우보다 최적 비용면에서 5.27%의 효과가 있는 것으로 나타났으며, PS 강연선의 금속쉬스나 그리스 또는 아스팔트로 코팅하고 또 파폭된 덕트(Type-D)보다는 8.69% 최적비용에서 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 마찰계수 중에서 곡률마찰계수보다는 파상마찰계수가 최적설계에 영향을 많이 미치는 인자로 판명되었으므로, 설계자는 시방규정에 제시된 제품 중에서 파상마찰계수가 작은 제품을 사용하도록 권장한다. 또한 마찰계수 값에 따른 최적설계 비용, 긴장력 및 공칭 거더 높이에 대한 그래프를 비교해보면 서로 비슷한 형상으로 나타났다. 여기서 긴장재의 마찰계수가 변화함에 따라 긴장력이 변화하게 되고, 이러한 긴장력의 변화가 공칭 거더 높이에 영향을 미치고 나아가 최적비용을 변화시키는 메카니즘 즉, 마찰계수와 긴장력, 공칭 거더 높이 및 최적비용 사이에 일련의 상관관계가 있음을 알 수 있었다
- (2) 주 구성재료의 강도 변화에 따른 PSC 박스 거더교의 최적설계 결과, 콘크리트와 철근의 강도가 2배증가시 최적비용의 절감 효과는 0.5~1%미만으로 나타났지만 긴장재의 강도가 2배증가시 최적비용은 20%정도의 재료 경비 절감의 효과가 발생하였다. 즉 PSC 박스 거더교에서

는 콘크리트와 철근에 비해 긴장재의 강도 증진의 영향이 더욱 민감하고 재료경비 절감의 측면에서도 영향이 크게 나타났다. 그러므로 최적설계시 긴장재의 강도증진 사항을 제약조건으로 고려하고, 재료학적인 측면에서 보면 가급적 고강도 긴장재의 개발과 연구가 많이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

단 위 환 산

$$1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kgf}, \quad 1 \text{ in} = 2.54 \text{ cm}, \quad 1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$$

$$1 \text{ ksi} = 1,000 \text{ psi} = 1,000 \text{ lb/in}^2$$

감사의 글

본 연구는 2004년 학술진흥재단 해외포닥 지원사업(접수번호 : M01-2004-000-20005-0)으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 재단에 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

김기욱(2002) FSM 공법 PSC 박스거더교의 최적설계, 박사학위논문, 경북대학교.
 김기욱, 박문호(2004) 부등 경간 비율, 하중계수 및 변단면의

영향을 고려한 PSC 박스 거더교의 최적설계, 전산구조공학회지, 제 17권, 제 3호, pp.309~318.
 김기욱, 박문호(2004) PSC 박스 거더교 최적설계에 의한 최적비용식의 개발, 대한토목학회지, 제 24권, 제 5A호, pp.961~968.
 김기욱, 박문호, 장준호(2004) FSM 공법 PSC 박스 거더교의 최적설계에 관한 연구, 구조물진단학회지, 제 8권, 제 3호, pp.159~167.
 박문호, 조효남, 류연선(1991) 구조물의 최적설계, 한국전산구조공학회.
 허택녕(1994) 전산구조해석, 엔지니어즈, 편집부편(2004), 물가자료, 한국물가협회.
 AASHTO(2002) *Standard Specifications for Highway Bridges*. USA.
 C. Menn(1990) *Prestressed Concrete Bridges*. Berkhauser Verlag, Basel, London
 Kavlie, D.(1970), *Optimum Design of Statically Indeterminate Structures*, Dep., of Civil Engineering, Univ. of California, Berkeley, USA
 Arora, J. S.(1989) *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill Book Company, USA.
 (접수일자 : 2005. 11. 23 / 심사일 2005. 12. 22 / 심사완료일 2006. 3. 27)