

상용압연 형강을 이용한 콘크리트 합성거더의 다단계 긴장력 최적설계

Optimal Tension Forces of Multi-step Prestressed Composite Girders Using Commercial Rolled Beams

신 영 석[†] 정 흥 시^{*} 김 영 우^{**} 박 재 만^{***}
Shin, Yung-Seok Jung, Heung-Shi Kim, Young-Woo Park, Jea-Man
(논문접수일 : 2005년 5월 24일 ; 심사종료일 : 2006년 5월 30일)

요 지

본 연구에서는 상용 압연형강과 콘크리트 합성거더인 PSSC(Prestressed Steel and Concrete) 거더의 1, 2차 긴장력과 활하중을 최적설계 하였다. 다단계 긴장에 따른 1, 2차 긴장력과 활하중을 설계변수로 삼았으며, 최종 활하중을 목적함수로 정하였다. 시공단계에 따른 강주형, 충전 콘크리트, 슬래브의 상연과 하연의 허용응력을 설계 조건으로 하였다. 설계 최적화는 상용 프로그램 Matlab 의 최적화 모듈을 이용하여 수행 되었다. 형고의 변화, 콘크리트 압축강도의 변화, 헌치 높이의 변화 등 다양한 조건에 따른 최적 설계를 시도하였고, 연구 결과로부터 강선배치, 콘크리트 압축강도 등이 설계에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 합성거더, 다단계 긴장, 최적설계

Abstract

The 1st and 2nd tension forces of the PSSC(Prestressed Steel and Concrete) girder constructed with commercial rolling beams and concrete are optimally designed. The design variables are the 1st and 2nd tension forces due to multi-step prestressing and live load. The objective function is set to the maximum live load. Design conditions are allowable stresses at the top and bottom of slab, beam and infilled concrete due at the several construction stages. A Matlab based optimization program is developed. The results show that the tendon position as well as concrete compression strength have significant influence on the beam strength.

Keywords : composite girder, multi-step prestressing, optimal design

1. 서 론

강재를 이용한 교량은 구조적 거동이 명확하고 내진에 유리하다는 것은 익히 알려진 사실이다. 하지만 국내의 교량들은 주로 콘크리트 교량을 중심으로 건설되었고 현재에도 압도적으로 많은 것이 현실이다.

최근에는 새로운 복합재료의 도입을 위한 다양한 연구개발이 진행되고 있으며 일부에서는 복합재료를 이용한 실교량의 제작 및 시공사례 또한 보고되고 있다. 그러나 아직까지

는 실제교량에 있어 콘크리트와 강재는 가장 보편적인 재료로써 활용되고 있다.

1960년대 프리스트레스를 이용한 교량이 처음 건설되면서 긴장재를 이용한 프리스트레싱 공법과 시공이 급증하고 있다. Preflex, ATOM, IPC, SCP 등의 프리스트레스를 이용한 공법들이 최근 활발히 연구되고 있으며 건설 현장에도 많이 사용되고 있다. 하지만 강교에 프리스트레싱을 하는 것이 매우 어려운 일이며, 강재와 콘크리트의 합성거더를 제작하는데 많은 비용이 소비되고 있다.

[†] 책임저자, 정회원 · 아주대학교 토목공학과 정교수
전화: 031-219-2505 ; Fax: 031-219-2501
E-mail: ysshin@ajou.ac.kr

^{*} 정회원 · (주)대한콘설탄트 · 공학석사

^{**} 학생회원 · 아주대학교 토목공학과 박사과정

^{***} 신특수건설(주) 구조연구소장

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2006년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 공장 생산되는 압연형강을 조합하여 폐단면의 구조를 만들고 내부에 긴장재를 배치하여 콘크리트를 충전한 합성형 강교량을 만들어 강선을 이용한 긴장력의 도입을 통해 강재와 콘크리트가 갖고 있는 서로의 장점을 극대화하고 최소의 비용으로 최대의 효과를 기대할 수 있는 새로운 형식의 교량을 제안한다.

본 연구에서는 이러한 신개념 합성거더의 다단계 긴장절차에 따른 거동특성을 규명하고 최적설계기법을 적용하여 단계별 긴장력을 콘크리트의 압축강도, 형강의 크기 및 보강강판의 두께 등 다수의 설계인자에 대하여 최적화하였다.

2. PSSC(Prestressed steel and concrete) 주형의 설계 및 시공 단계

그림 1은 연구 대상인 주형의 중앙 단면을 보여주고 있다. 본 PSSC 주형은 슬래브, 강재주형 그리고 내부 충전 콘크리트로 구성되어있으며 충전 콘크리트 하부에 2열 총 6개의 강선이 배치되어있다.

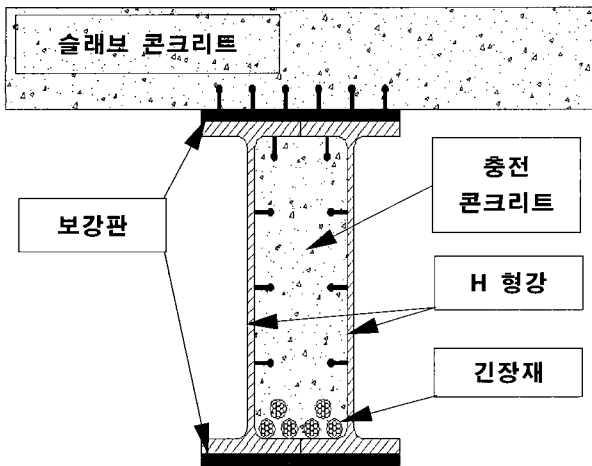


그림 1 설계 단면

기본적인 조건으로는 918×303×19×37(mm) 형강을 사용하였으며 상하부 플랜지 보강판을 각각 3cm씩 덧대었다. 긴장의 순서는 내부 충전 콘크리트를 타설하고 경화한 후 1차 긴장을 하였고, 슬래브 콘크리트를 타설하고 경화한 후 2차 긴장을 하였다. 콘크리트 압축강도(kgf/cm²)는 내부 충전 콘크리트 300kgf/cm², 슬래브 콘크리트 270kgf/cm²를 사용하였다. 1차 긴장력의 한계는 480tonf, 2차 긴장력의 한계는 240tonf이고, 긴장재의 위치는 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 2.5cm위에 있으며, 2차 긴장선은 7.5cm위에 위치하고 있다. 지간 길이는 40m이다.

표 1 시공 단계

설계 단계	하중 및 긴장력 작용
Step 1	강재 + 충전콘크리트 자중
Step 2	1차 긴장
Step 3	슬래브 자중
Step 4	2차 긴장
Step 5	합성후 고정하중 + 활하중

시공 단계에 따른 구분이 표 1에 표시되어 있으며 Step 1에서는 강재의 내부에 콘크리트를 충전하는 단계이다. Step 2에서는 강재와 충전 콘크리트의 합성단면에 1차 긴장력을 가한다. Step 3에서는 강재위에 슬래브를 타설하며 Step 4에서는 강재, 충전 콘크리트, 슬래브의 합성단면에 2차 긴장을 하는 단계이다. 마지막 Step 5에서는 시공이 끝난 주형 위 콘크리트 슬래브에 활하중을 재하하는 단계이다.

강재와 내부 충전 콘크리트는 강재로 이루어진 폐단면 안쪽에 스티드를 설치하여 합성단면을 구성하며, 합성주형과 슬래브는 상부플랜지 보강판 위에 스티드를 설치하여 합성단면을 구성한다.

3. 최적 설계 프로그램구성

3.1 최적 설계 방법

본 연구에서는 Matlab program의 Optimization tool에서 제공하는 constr.m 함수를 사용하였으며, 이 함수는 Sequential Quadratic Programming (SQP) 알고리즘을 사용하고 있다.

3.2 최적 설계 변수 및 목적함수

그림 1과 같은 형태의 주형에 내부를 콘크리트로 충전하고 2단계로 긴장을 하는 1차, 2차 긴장력과 최대 활하중 모멘트를 설계변수로 삼아 총 3개의 설계변수를 가지게 된다. 설계 목적함수는 실제 트럭하중에 의한 지간 중앙에서의 최대 활하중 모멘트를 목적함수로 하였으며, 이때의 차량 총중량은 1개 거더의 상부 슬래브가 1개 차선의 절반인 180cm이므로 차량의 한쪽 바퀴가 거더의 중앙에 올려진 상태의 최적화된 차량중량을 원래의 온전한 차량의 중량으로 환산 한 값이다.

$$F = -P(3)$$

여기서,

$$P(3) : \text{지간 중앙에서의 활하중 모멘트}$$

3.3 설계 제약 조건

설계 제약조건은 표 1과 같이 다단계로 나누어진 시공 단계마다 강재와 슬래브 및 충전 콘크리트 각각의 상·하연에 생기는 응력을 표 2의 도로교설계기준의 허용응력에 준하여 설계 제약 조건을 작성하였다.

표 2 도로교설계기준의 허용응력

구 분	압 축 (kgf/cm ²)	인 장 (kgf/cm ²)
강 재 (SM490)	1900	1900
콘 크 리 트	$0.55 f_{ci}$	$0.8 \sqrt{f_{ci}}$

표 3은 본 프로그램의 설계 제약조건을 표 1에서 제시한 시공단계마다 강재, 충전 콘크리트, 슬래브 콘크리트로 구분하여 각각의 상연과 하연에 대해 인장응력과 압축응력으로 분류한 것이다. 설계변수인 1차, 2차 긴장력의 최대, 최소한계와 활하중(차량 총중량) 모멘트의 최소한계를 포함하여 총 49개의 설계 제약조건을 구성하였다.

처짐에 관한 제약조건은 도로교설계기준에 맞추어 $L/500$ 을 적용하였으나, 연구진행과정에서 처짐 제약조건이 활성화되는 결과를 나타내어 처짐에 대한 제약조건을 제외하고 최적설계를 수행하였다.

4. 최적설계 결과 및 분석

4.1 시공순서에 따른 단면 응력의 변화

그림 2와 그림 3은 Step 1~Step 5까지의 시공순서에 따라 부재의 중앙단면에 발생하는 시공 단계별 응력과 단계별로 합산되어지는 응력을 보인 그래프이다.

그림 2는 강재에 발생하는 응력을 보인 것으로, Step 1~Step 5까지 모든 단계에 걸쳐 응력이 발생한다. 오른쪽의 작은 그래프가 단계별로 발생하는 응력이며 왼쪽의 큰 그래프가 단계별로 응력이 합산되어지는 그래프이다. 강재만의 응력을 보는 것이므로 상연의 슬래브에는 응력 그래프가 표시되지 않으며 중앙부에 표시되는 응력은 강재의 복부재에 발생하는 응력이다.

그림 3은 충전 콘크리트와 슬래브 콘크리트에 발생하는 응력을 보인 것으로 충전 콘크리트는 Step 2~Step 5까지 응력이 발생하며 슬래브 콘크리트에는 Step 4~Step 5까지 응력이 발생한다. 그래프 상에 슬래브 바로 아래와 맨 밑쪽은 강재의 상·하 플랜지 부분이므로 응력이 표시되지 않으며 오른쪽의 작은 그래프가 단계별로 발생하는 응력이며 왼쪽의 큰 그래프가 단계별로 응력이 합산되어지는 그래프이다.

표 3 설계 제약 조건 설명

설계 단계	제약조건 설명	강 재 (H-BEAM)		내부 충전 콘크리트		슬래브 콘크리트	
		상연	하연	상연	하연	상연	하연
Step 1	압축 허용 응력	G(1)	G(2)				
	인장 허용 응력	G(11)	G(12)				
Step 2	압축 허용 응력	G(3)	G(4)	G(21)	G(22)		
	인장 허용 응력	G(13)	G(14)	G(29)	G(30)		
Step 3	압축 허용 응력	G(5)	G(6)	G(23)	G(24)		
	인장 허용 응력	G(15)	G(16)	G(31)	G(32)		
Step 4	압축 허용 응력	G(7)	G(8)	G(25)	G(26)	G(37)	G(38)
	인장 허용 응력	G(17)	G(18)	G(33)	G(34)	G(41)	G(42)
Step 5	압축 허용 응력	G(9)	G(10)	G(27)	G(28)	G(39)	G(40)
	인장 허용 응력	G(19)	G(20)	G(35)	G(36)	G(43)	G(44)
		1차 긴장력		2차 긴장력		차량 총중량	
최 대 한 계		G(45)		G(46)			
최 소 한 계		G(47)		G(48)		G(49)	

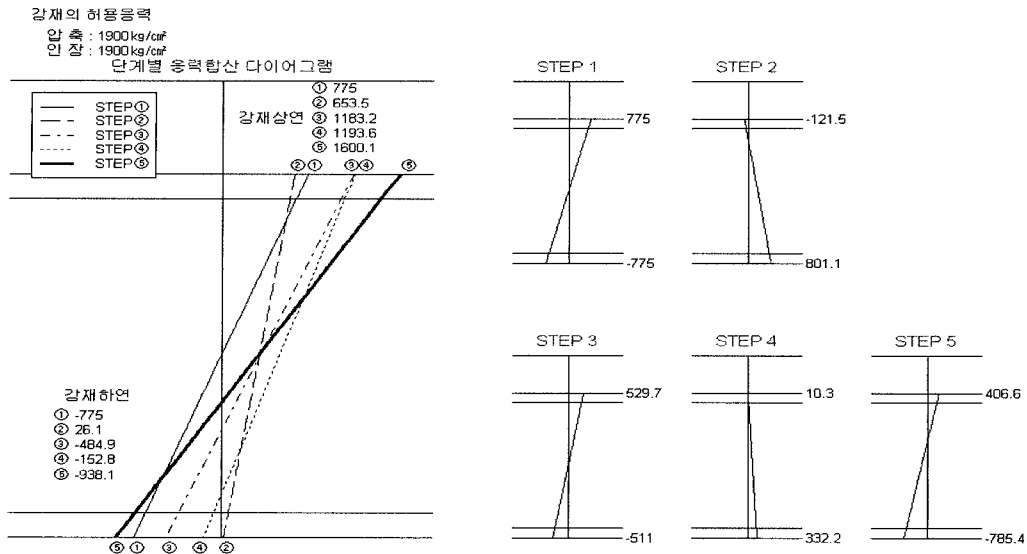


그림 2 강재 응력 다이어그램

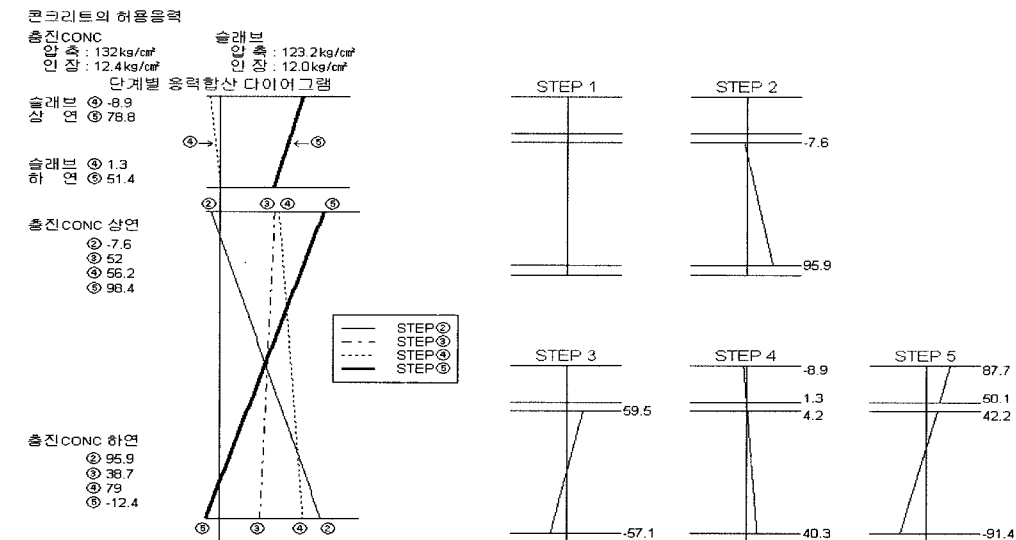


그림 3 콘크리트 응력 다이어그램

4.2 강선 배치 변화에 따른 비교

표 4는 일정한 단면에 강선의 개수와 배치의 변화를 변수로 하여 비교한 결과를 나타내고 있다. 표 4에 제시되고 있는 6개의 구분은 강선의 개수와 배치에 따른 구분을 나타내며 그림 4에 나타내었다. 이 경우 918×303×19×37(mm) 형강을 사용 하였으며 상하부 플랜지에 3cm 두께의 보강판을 각각 덧대었다. 긴장의 순서는 내부 충전 콘크리트를 타설하고 경화한 후 1차 긴장을 하였고, 슬래브 콘크리트를 타설하고 경화한 후 2차 긴장을 하였다. 콘크리트 압축강도 (kgf/cm²)는 내부 충전 콘크리트의 경우 300kgf/cm², 슬래브 콘크리트의 경우 270kgf/cm²을 사용하였다.

표 4 강선 배치 변화에 따른 설계 결과

구분	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	1,2차 긴장력 상한계 (tonf)
(1)	245.4	245.4	23.68	Infeasible (32 36 45 46)	240 . 240
(2)	300.0	240.0	32.36	36 45 46	300 . 240
(3)	360.0	360.0	65.80	36 45 46	360 . 360
(4)	480.0	240.0	66.88	36 45 46	480 . 240
(5)	480.0	240.0	71.09	36 45 46	480 . 240
(6)	480.0	240.0	87.04	36 45 46	480 . 240

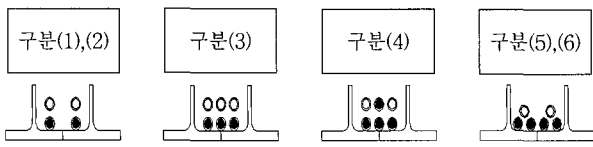


그림 4 강선 배치 모형

그림 4는 충전 콘크리트 하단에 위치한 강선의 배치 모형이며 검은색이 1차, 흰색이 2차 긴장을 하는 긴장재를 나타낸다. 구분 (1)~(5)의 경우 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 8cm위에 있으며, 2차 긴장선은 18cm 위에 있다. 구분 (6)은 1차 긴장선이 2.5cm 위에 있으며, 2차 긴장선이 7.5cm 위에 위치하고 있다.

긴장재 각각의 긴장력의 상한값은 120tonf이므로 구분 (1)은 1, 2차의 긴장한계가 각각 240tonf이다. 이때 240 tonf의 긴장력으로는 슬래브가 타설 되는 Step 3에서 충전 콘크리트 하연에서의 인장응력이 허용인장응력을 벗어나기 때문에 최적 설계 결과에서 표에 나타난 4개(32,36,45,46)의 제약조건을 충족하지 못하는 결과를 나타내고 있다.

구분 (2)는 허용응력한계를 넘어 Infeasible이 되는 구분 (1)의 1차 긴장 한계를 300tonf으로 재조정하여 최적화한 값이다.

표 4의 활성화 제약조건 중 36번은 Step 5에서의 활하중 적용 시에 충전 콘크리트 하연의 허용인장응력이며, 45번 제약조건은 1차 긴장력의 최대한계이고 46번 제약조건은 2차 긴장력의 최대한계이다.

표의 최적설계결과에서 1차와 2차의 긴장력은 모두 최대 값에 도달함을 알 수 있다. 또한 강선의 수가 증가하면 차량 총중량 즉 내하력이 증가함을 알 수 있고 강선의 위치가 낮아지는 (6)에서 내하력 증가가 관찰된다.

4.3 긴장력 한계 변화에 따른 비교

전절 4.2의 결과에서 설계변수로 삼은 강선의 긴장력이 모두 상한값에 도달한 경과를 보여주었다. 따라서 본 절에서는 1차, 2차 긴장력의 상한값을 증가해 가며 설계를 수행하였고 그 결과가 표 5에 나타나 있다. 강재의 규격과 콘크리트의 강도 등 제반설계조건은 4.2절의 값을 적용하였으며 긴장재의 위치는 표 4의 구분 (6)에서 제시한 것과 같이 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 2.5cm 위에 있으며, 2차 긴장선은 7.5cm 위에 위치하고 있다. 표 5의 구분 (1)은 2차 긴장력 상한을 고정시키고 1차 긴장력 상한을 변화한 결과이며, 구분 (2)는 1차 긴장력 상한을 고정시키고 2차 긴장력의 상한값을 변화한 결과이다. 구분 (3)은 1, 2차 긴장력의 상한을 모두 변화한 결과이다.

각각의 긴장재 긴장력의 한계값은 120tonf이므로 구분 (1)의 2차 긴장력은 240tonf로 고정하였고, 구분 (2)의 1차 긴장력은 480tonf로 고정하였다.

구분 (1)에서 1차 긴장력의 한계가 700tonf 이상이 되면 1차 긴장력이 661.0tonf로 고정되는 것을 볼 수 있으며 이때 제약 조건 22번은 Step 2에서 충전 콘크리트 하연의 허용압축응력 한계이다.

구분 (2)에서 2차 긴장력의 한계가 400tonf 이상이 되면 2차 긴장력이 318.3tonf로 고정되는 것을 볼 수 있으며, 이때 2차 긴장력을 제한하는 제약 조건 41번은 Step 4에서 슬래브 콘크리트 상연의 허용인장응력 한계이다.

구분 (3)에서 2차 긴장력은 구분 (2)에서 긴장력 한계가 400tonf 이상일 때의 값과 같은 값이 나오는 것을 볼 수 있으며 구분 (2)에서와 같이 2차 긴장력을 제한하는 제약 조건 41번은 Step 4에서 슬래브 콘크리트 상연의 허용인장응력 한계이다. 구분 (3)에서 1차 긴장력은 구분 (1)의 1차 긴장력 한계가 700tonf 이상일 때의 값보다 작게 나오는 것을 볼 수 있다. 목적함수인 차량 총중량이 제약조건 39인 Step 5에서의 활하중 적용 시 슬래브 상연의 허용압축응력 한계에 의해서 제약이 되기 때문에 슬래브에 영향을 미치지 않는 1차 긴장에 의한 제약조건들은 활성화 되지 않는다. 따라서 1차 긴장력은 일정값 이상만을 유지하고 2차 긴장력은 제약조건 41번인 Step 4에서 2차 긴장 시 슬래브 상연의 허용인장응력 한계까지 긴장하게 된다.

표 5 긴장력 한계 변화에 따른 설계 결과

구분	긴장력 한계 (kgf/cm ²)		P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
	1차	2차					
(1)	300	240	300.0	240.0	46.25	36 45 46	
	400	240	400.0	240.0	68.91	36 45 46	
	480	240	480.0	240.0	87.04	36 45 46	
	500	240	500.0	240.0	91.58	36 45 46	
(2)	600	240	600.0	240.0	114.22	36 45 46	22
	700	240	661.0	240.0	128.05	22 36 46	9
	800	240	661.0	240.0	128.05	22 36 46	9
	480	100	480.0	100.0	60.37	36 45 46	
(3)	480	200	480.0	200.0	79.42	36 45 46	
	480	300	480.0	300.0	98.47	36 45 46	
	480	400	480.0	318.3	101.96	36 41 45	
	800	600	656.6	318.3	137.8	39 41	36

표 5에 대한 결과를 그림 5와 그림 6에 그래프로 나타내었다. 그림 5와 그림 6에 나타나듯이 긴장력의 한계가 들어가면서 차량 총중량의 증가가 완만해 지다가 수렴하는 것을 알 수 있다.

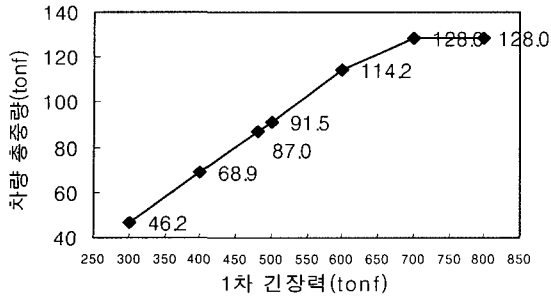


그림 5 1차 긴장력 한계 변화 그래프

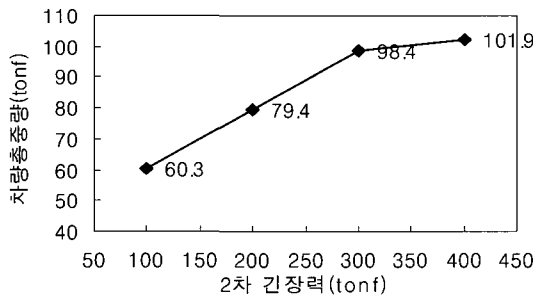


그림 6 2차 긴장력 한계 변화 그래프

4.4 형강 변화에 따른 비교

표 6은 일정한 긴장재의 배치에 형강을 바꾸어 전체 단면의 변화를 변수로 하여 비교한 결과를 나타내고 있다. 콘크리트의 강도와 긴장재의 위치 등 제반설계조건은 4.3절의 값을 적용하였으며 1차 긴장력의 한계는 480tonf, 2차 긴장력의 한계는 240tonf이다. 제시되고 있는 7개의 구분은 형강의 크기에 따른 구분이다. 구분 (1)~(3)번은 국내에서 생산되는 규격의 형강이며 구분 (4)~(7)번은 외국에서 수입되는 형강이다.

표 6 형강 변화에 따른 설계 결과

구분	높이×폭×웹폭 ×플랜지두께 (mm)	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
(1)	792×300×14×22	480.0	174.4	57.42	9 36 45	
(2)	800×300×14×26	480.0	240.0	69.69	36 45 46	9 27
(3)	808×302×16×30	480.0	240.0	69.94	36 45 46	9
(4)	890×299×15×23	455.2	240.0	79.21	29 36 46	9
(5)	900×300×16×28	480.0	240.0	85.77	36 45 46	9
(6)	912×302×18×34	480.0	240.0	86.57	36 45 46	
(7)	918×303×19×37	480.0	240.0	87.04	36 45 46	

구분 (1)의 결과에서 2차 긴장력을 긴장력 한계인 240tonf까지 긴장하지 않는 것은 2차 긴장을 최대도 하여 강재의 상연과 충전 콘크리트 하연에 압축력을 가할 때 설계 제약 조건 9번인 Step 5에서 활하중이 작용할 때 강재 상연의 압축응력이 허용압축응력을 초과하기 때문이다.

구분 (4)의 결과에서 1차 긴장력을 긴장력 한계인 480tonf까지 긴장하지 않는 것은 설계 제약 조건 29번인 Step 2에서 충전 콘크리트 상연의 허용인장응력한계로 인해 1차 긴장력을 최대한계까지 긴장하지 못하기 때문이다.

구분 (1)번과 (4)번을 제외한 나머지 결과에서는 모두 1차 긴장력과 2차 긴장력을 긴장력 한계까지 긴장할 때 목적 함수인 차량 총중량이 커지는 것을 알 수 있다.

그림 7은 표 6의 결과 중 형강의 단면적에 대한 차량총중량의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 국내 생산되는 것이 아래쪽 그래프이며 좌측부터 구분 (1)~(3)번이고, 국외 생산되는 것이 위쪽 그래프이며 좌측부터 구분 (4)~(7)번이다.

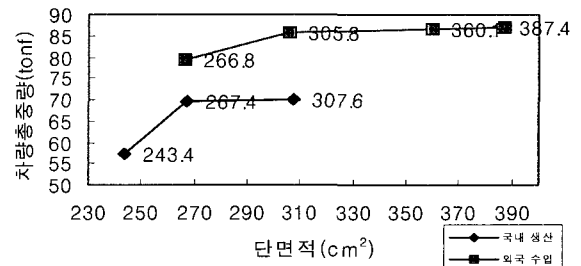


그림 7 형강 변화 그래프

4.5 콘크리트 압축강도 변화에 따른 비교

표 7은 내부 충전 콘크리트와 슬래브 콘크리트의 압축강도 변화를 변수로 하여 비교한 결과를 나타내고 있다. 강재의 규격과 콘크리트의 강도 등 제반설계조건은 4.2절의 값을 적용하였으며 긴장재의 위치는 표 4의 구분 (6)에서 제시한 것과 같이 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 2.5cm 위에 있으며, 2차 긴장선은 7.5cm 위에 위치하고 있다. 구분 (1)은 슬래브 콘크리트 압축강도를 고정시키고 충전 콘크리트 압축강도를 변화한 결과이며, 구분 (2)는 충전 콘크리트 압축강도를 고정시키고 슬래브 콘크리트 압축강도를 변화한 결과이다.

표 7 압축강도 변화에 따른 설계 결과

구분	압축강도 (kgf/cm²)		P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
	내부 충전	슬래브					
(1)	300	270	480.0	240.0	87.04	36 45 46	
	400	270	480.0	240.0	86.04	36 45 46	
	500	270	480.0	240.0	85.14	36 45 46	

표 7 압축강도 변화에 따른 설계 결과(계속)

구분	압축강도 (kgf/cm ²)		P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
	내부 충전	슬래브					
(2)	300	100	480.0	240.0	60.30	36 45 46	
	300	150	480.0	240.0	83.66	36 45 46	
	300	200	480.0	240.0	85.56	36 45 46	
	300	300	480.0	240.0	87.56	36 45 46	
	300	400	480.0	240.0	88.30	36 45 46	

전체적으로 내부 충전 콘크리트 압축강도가 올라가면 목적합수 값이 작아지고 슬래브 콘크리트 압축강도가 올라가면 목적합수의 값이 커지는 것을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9는 표 7의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 압축강도가 일정한 값 이상에서는 차량총중량의 증가가 완만해지는 것을 알 수 있다.

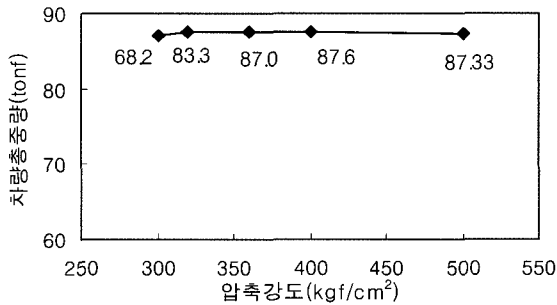


그림 8 충전 콘크리트 압축강도 변화 그래프

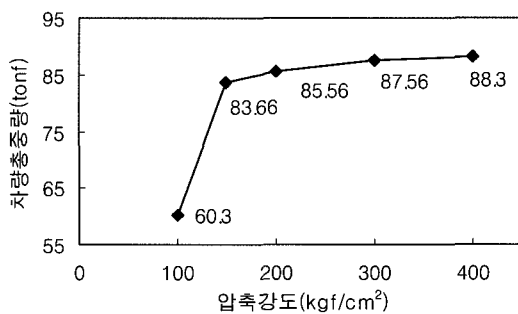


그림 9 슬래브 콘크리트 압축강도 변화 그래프

4.6 상·하 플랜지 보강판 두께 변화에 따른 비교

표 8은 상하부 플랜지의 보강판 두께 변화를 변수로 하여 비교한 결과를 나타내고 있다. 상부플랜지와 하부플랜지에 같은 두께의 보강판을 덧대어서 상부와 하부가 같은 두께로 변화하며, 보강판을 덧대지 않고 상하부 플랜지만 있는 3.7cm부터 보강판을 4cm씩 덧대어서 전체 두께가 7.7cm

일 때까지 변화하였다. 강재의 규격과 콘크리트의 강도 등 제반설계조건은 4.2절의 값을 적용하였으며 긴장재의 위치는 표 4의 구분 (6)에서 제시한 것과 같이 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 2.5cm 위에 있으며, 2차 긴장선은 7.5cm 위에 위치하고 있다.

보강판의 두께가 1.5cm 이하로 작아지면 충전 콘크리트 상연의 허용인장응력 한계로 인해 1차 긴장력이 제한을 받으며, 0.5cm 이하에서는 2차 긴장력도 제한을 받는다. 전체적으로는 보강판의 두께를 1.5cm 이하로 할 때 목적합수의 값이 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

표 8 상하 플랜지 보강판 두께 변화에 따른 설계 결과

보강판 두께	플랜지+ 보강판	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
0 cm	3.7 cm	242.0	184.3	21.78	Infeasible	
0.5 cm	4.2 cm	271.6	225.9	29.10	29 36 41	9
1 cm	4.7 cm	333.1	240.0	47.69	29 36 46	9
1.5 cm	5.2 cm	480.0	240.0	66.64	29 36 46	9 41
2 cm	5.7 cm	480.0	240.0	84.33	36 45 46	9 29
3 cm	6.7 cm	480.0	240.0	87.04	36 45 46	
4 cm	7.7 cm	480.0	240.0	89.94	36 45 46	

보강판의 두께가 0cm가 되면 구조물 전체의 단면력이 감소하므로 1차 긴장력과 2차 긴장력을 긴장력 한계까지 긴장하지 못하게 되며 긴장 전후에 오는 사하중을 충분히 감당하지 못하므로 최적화 수행이 되지 않는다.

그림 10은 표 8에 대한 결과를 그래프로 나타낸 것으로 보강판의 두께가 2cm 이하일 때는 차량 총중량의 값이 큰 폭으로 증가하다가 2cm 이상이 되면 완만히 증가하는 것을 알 수 있다.

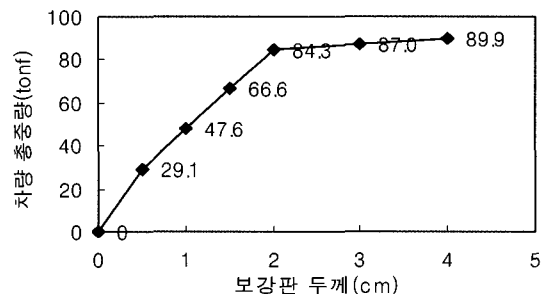


그림 10 상하 플랜지 보강판 두께 변화 그래프

4.7 긴장순서 변화에 따른 비교

표 9는 시공 단계의 긴장순서 및 절차를 변화하며 비교한

결과를 나타내고 있다. 강재의 규격과 콘크리트의 강도 등 제반설계조건은 4.2절의 값을 적용하였으며 긴장재의 위치는 표 4의 구분 (6)에서 제시한 것과 같이 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 2.5cm 위에 있으며, 2차 긴장선은 7.5cm 위에 위치하고 있다. 제시되는 4개의 구분에서 구분 (1)은 강재에만 1차 긴장을 하고 충전 콘크리트와 슬래브 콘크리트를 모두 타설하고 경화한 후에 2차 긴장을 하며, 구분 (2)는 강재에 충전 콘크리트와 슬래브 콘크리트를 타설하여 모두 합성한 후에 1회만 긴장을 한다. 구분 (3)은 강재에 충전 콘크리트를 타설하고 경화한 후 1차 긴장을 하고 슬래브 콘크리트를 타설하고 경화한 후 2차 긴장을 하며, 구분 (4)는 강재에 충전 콘크리트를 타설한 후 1차 긴장을 하고 슬래브 콘크리트를 타설한 후에 슬래브 콘크리트가 경화되기 전에 2차 긴장을 한다.

표 9의 결과는 긴장 순서의 변화로 인해 설계 순서가 변화하여 표 1에서 제시했던 설계 단계와 다소 차이가 있으므로 설계 제약 조건의 번호가 표 3과 일치하지 않는다.

표 9 긴장 순서 변화에 따른 설계 결과

구분	1차 긴장	2차 긴장	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
(1)	강재	슬래브 경화후	200.0	240.0	43.07	28 38	
(2)	슬래브 경화후 (2차긴장만)		-	255.6	50.95	20 25	
(3)	내부 충전후	슬래브 경화후	480.0	240.0	87.04	36 45 46	
(4)	내부 충전후	슬래브 경화전	480.0	240.0	88.67	36 41 42	

구분 (1)의 결과에서는 강재에만 작용시킨 1차 긴장력이 설계를 제약하는 충전 콘크리트 하연의 인장응력에 영향을 주지 못하므로 긴장의 효과가 없었다. 강재의 응력은 허용응력에 비해 안전 범위 내에 속해있으며, 1차 긴장력의 최적화 값은 프로그램 실행시 설정한 초기값 그대로이다. 설계 제약 조건 28번은 활하중 적용 시 충전 콘크리트 하연의 허용인장응력이며, 설계 제약 조건 38번은 2차 긴장력의 최대한계이다.

구분 (2)는 6개 강선을 슬래브 경화 후 1회만 긴장하며 슬래브 상연의 허용인장응력 한계로 인해 긴장력이 제한되어 긴장력 한계인 720tonf까지 긴장하지 못하였다. 설계 제약 조건 20번은 활하중 적용 시 충전 콘크리트 하연의 허용인장응력이며, 설계 제약 조건 25번은 긴장시 슬래브 상연의 허용인장응력을 나타낸다.

구분 (4)에서는 슬래브 콘크리트 경화 전에 2차 긴장을 하였으며, 슬래브 콘크리트 경화 후 2차 긴장을 하는 구분 (3)의 결과보다 약간의 증가효과가 있음을 알 수 있다. 설계 제약 조건 36번은 활하중 적용 시 충전 콘크리트 하연의 허용인장응력이며, 설계 제약 조건 41번은 1차 긴장력의 최대한계, 설계 제약 조건 42번은 2차 긴장력의 최대한계를 나타낸다.

4.8 현치 높이 변화

표 10은 현치 높이를 변수로 하여 비교한 결과를 나타내고 있다. 현치 설치에 따른 자중 증가 효과는 무시하고 현치에 의한 형고의 높이와 편심증가만을 고려한 결과이다. 현치는 강재의 상부플랜지 보강판 위와 슬래브 콘크리트 하연 사이에 두었으며 현치 높이를 0cm에서 25cm까지 변화하여 최적 설계를 수행한 결과를 표 10에 나타내었다. 강재의 규격과 콘크리트의 강도 등 제반설계조건은 4.2절의 값을 적용하였으며 긴장재의 위치는 표 4의 구분 (6)에서 제시한 것과 같이 1차 긴장선이 하부플랜지로부터 2.5cm 위에 있으며, 2차 긴장선은 7.5cm 위에 위치하고 있다.

표 10 현치 변화에 따른 설계 결과

현치 높이	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량 총중량 (tonf)	활성화 조건	근접 조건
0 cm	480.0	240.0	87.04	36 45 46	
5 cm	480.0	240.0	95.78	36 45 46	
10 cm	480.0	240.0	106.54	36 45 46	9
15 cm	480.0	240.0	119.79	36 45 46	9 27 39
19 cm	480.0	240.0	132.61	36 45 46	9 27 39
20 cm	471.7	240.0	132.66	39 46	9 27 36
21 cm	472.2	240.0	132.73	39 46	9 27
25 cm	480.0	137.2	133.39	36 39 46	9 27

현치 높이 0cm의 결과부터 현치 높이 19cm의 결과까지 차량 총중량이 큰 폭으로 늘어나는 것을 알 수 있다. 현치 높이 20cm 이후로는 다소의 증가만이 있음을 알 수 있다.

편심의 증가로 인해 긴장력의 효과가 증대되면서 차량 총중량의 값이 급격히 증가하지만 현치 높이가 20cm 이상이 되면 설계 제약 조건 39번인 활하중 적용 시 슬래브 상연의 압축응력이 허용압축응력에 제약이 되기 때문에 차량 총중량의 증가가 둔해짐을 알 수 있다.

그림 11은 표 10에 대한 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

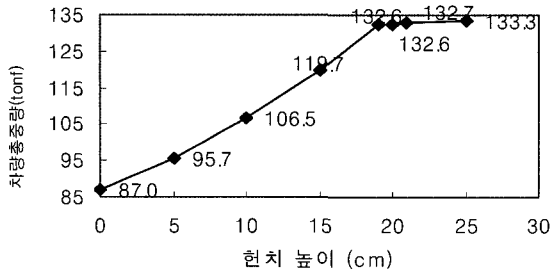


그림 11 현치 높이 변화 그래프

4.9 프리스트레스 손실량 고려에 따른 최적 설계 거더의 최대 차량 하중

표 11~표 13은 형강의 변화에 따라 긴장력의 손실을 일률적으로 15%~25%까지 적용한 결과를 나타내고 있다. 긴장력의 손실은 긴장 후 적용하는 것으로 기존의 5 Step으로 이루어진 설계단계에서 1차 긴장을 하는 Step 2와 2차 긴장을 하는 Step 4 뒤에 긴장력 손실 후 응력을 검토하는 단계를 추가하여 7 Step으로 설계 단계를 확대하였다. 제시되고 있는 7개의 구분은 형강의 크기에 따른 구분이다. 본 절에서 사용된 강재와 콘크리트의 규격 및 물성치는 4.4절에서 제시된 값을 적용하였다.

표 11~표 13의 결과는 기존의 5 Step에서 7 Step으로 설계 단계를 확대하여 표 1에서 제시했던 설계 단계와 다소 차이가 있으므로 설계 제약 조건의 번호가 표 3과 일치하지 않는다.

표 11 프리스트레스 손실을 15% 적용한 결과

구분	높이×폭×웹폭×플랜지두께 (mm)	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량총중량 (tonf)	활성화 조건
(1)	792×300×14×22	480	240	47.19	52,65,66
(2)	800×300×14×26	480	240	48.24	52,65,66
(3)	808×302×16×30	480	240	48.67	52,65,66
(4)	890×302×18×34	455.2	240	56.45	41,52,66
(5)	900×300×16×28	480	240	62.31	52,65,66
(6)	912×302×18×34	480	240	63.31	52,65,66
(7)	918×303×19×37	480	240	63.86	56,65,66

표 12 프리스트레스 손실을 20% 적용한 결과

구분	높이×폭×웹폭×플랜지두께 (mm)	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량총중량 (tonf)	활성화 조건
(1)	792×300×14×22	480	240	40.02	52,65,66
(2)	800×300×14×26	480	240	41.09	52,65,66
(3)	808×302×16×30	480	240	41.58	52,65,66

표 12 프리스트레스 손실을 20% 적용한 결과(계속)

구분	높이×폭×웹폭×플랜지두께 (mm)	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량총중량 (tonf)	활성화 조건
(4)	890×302×18×34	455.2	240	48.86	41,52,66
(5)	900×300×16×28	480	240	54.49	52,65,66
(6)	912×302×18×34	480	240	55.55	52,65,66
(7)	918×303×19×37	480	240	56.14	56,65,66

표 13 프리스트레스 손실을 25% 적용한 결과

구분	높이×폭×웹폭×플랜지두께 (mm)	P1 (tonf)	P2 (tonf)	차량총중량 (tonf)	활성화 조건
(1)	792×300×14×22	480	240	32.84	52,65,66
(2)	800×300×14×26	480	240	33.94	52,65,66
(3)	808×302×16×30	480	240	34.49	52,65,66
(4)	890×302×18×34	455.2	240	41.28	41,52,66
(5)	900×300×16×28	480	240	46.66	52,65,66
(6)	912×302×18×34	480	240	47.80	52,65,66
(7)	918×303×19×37	480	240	48.41	56,65,66

구분 (1)~구분 (7)까지 형강이 변화하면서 차량 총중량의 값이 증가하는 것을 알 수 있으며 형강 변화에 따른 비교는 최적설계 결과 4.4의 표 6에 잘 나타나있다. 설계 변수인 1차 긴장력과 2차 긴장력은 표 6과 동일한 값으로 나타났으며 손실률이 증가할수록 긴장에 의한 하연의 압축응력이 감소하여 설계 제약 조건 52번인 Step 5에서의 활하중 적용 시 충전 콘크리트 하연의 허용인장응력에 제약이 되기 때문에 차량 총중량의 값이 줄어드는 것을 알 수 있다.

구분 (4)의 결과에서 1차 긴장력을 긴장력 한계인 480tonf 까지 긴장하지 않는 것은 설계 제약 조건 41번인 Step 2에서 충전 콘크리트 상연의 허용인장응력한계로 인해 1차 긴장력을 최대한계까지 긴장하지 못하기 때문이다.

설계 제약 조건 65번은 1차 긴장력의 최대 한계이며, 설계 제약 조건 66번은 2차 긴장력의 최대 한계이다.

그림 12는 표 11~표 13에 대한 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

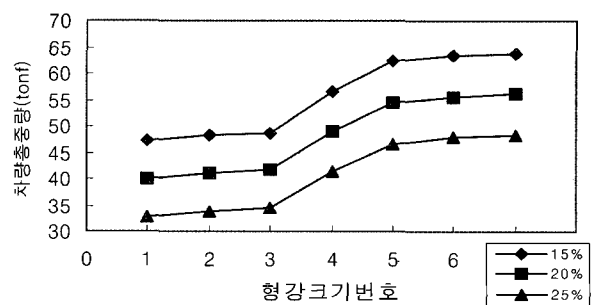


그림 12 프리스트레스 손실 변화 그래프

5. 결 론

본 연구에서는 2단계 긴장을 하는 상용압연형강과 콘크리트 합성거더의 1, 2차 긴장력을 최적화하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강재보다 내부 충전 콘크리트의 허용인장응력이 설계를 결정하게 되므로 내부 충전 전에 긴장하는 것보다 내부 충전 후에 긴장하여 충전 콘크리트에 압축력을 가하는 것이 전체 설계에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 슬래브와 충전 콘크리트의 압축강도를 변화시키면 합성단면의 중립축의 변화가 생기게 되어 충전 콘크리트의 압축강도를 올리면 재하할 수 있는 활하중이 작아지고 슬래브 콘크리트의 압축강도를 올리면 활하중의 크기가 커지는 것을 알 수 있었다.
- 3) 2차 긴장을 슬래브 콘크리트가 경화되기 전인 타설 직후에 긴장할 때 내하력이 다소(1.9%) 증가하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 압연형강의 상하부 플랜지에 보강판을 설치함으로써 내하력이 크게 증가하며, 일정 두께(2cm)이상의 보강판은 내하력에 큰 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있었다.
- 5) 현치를 포함할 경우 일정 높이(19cm)이상 일 때 내하력에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

위와 같은 결과로 PSSC 거더는 강재와 PSC의 장점을 모두 포함하여 거더의 높이를 낮추고 장경간화 할 수 있으며 내하력을 크게 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 (주)신특수건설 신교량 개발의 일부분으로 연구비를 지원해 주신 산학협동재단과 (주)신특수건설에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2000) 도로교 설계기준, 한국도로교통협회, 2000, p.474.
- 건설교통부 (1996) 도로교 표준 시방서 I, 대한토목학회, p.525.
- 한국콘크리트학회 (2003) 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, p.405.
- 건설교통부 (2000) 도로설계편람(III), 건설교통부, p.1003.
- 대한토목학회 (2003) 도로교설계기준·해설, 대한토목학회, p.770.
- 신현목 (1999) 프리스트레스트 콘크리트, 동명사, p.425.
- 변동균, 신현목, 문제길 (2000) 철근콘크리트, 동명사, p.579.
- 김정호, 박경훈, 황윤국, 최영민, 조효남 (2002) 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 개발을 위한 실험연구, 한국강구조학회논문집, 14(5), pp.593~602.
- 한만엽, 김진근, 이차돈, 박준범 (1998) 프리스트레스트를 단계적으로 도입하는 IPC거더의 설계 이론 연구, 콘크리트학회, 10(5), pp.1~12.
- Garret N.Vanderplaats (1984) *Numerical optimization techniques for engineering design*.
- The Mathworks (2003) *MATLAB Version 6.5(The Language of Technical Computing) User's Manual, The Mathworks*.