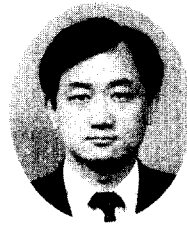
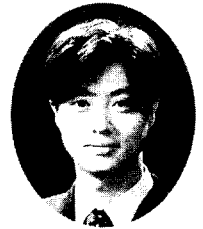


## New England 벌브티 거더의 설계 제작 및 시공



한만엽\*



박준범\*\*

현재 국내에서 시공되고 있는 PSC I형 교량은 지간이 30m이하로 제한되어 있으며, 그 이상의 지간에 대해서는 강교 또는 PSC box형 교량으로 시공하고 있다. 그러나 경제적인 면과 시공후의 유지관리 비용이 상대적으로 크다는 단점 때문에 외국에서도 경제성과 시공성을 모두 갖춘 교량을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 그 중에서도 현재에는 기존 I형 거더의 단면에 변화를 주어 장경간 교량에 적합하도록 만든 벌브티 거더에 대한 연구가 폭넓게 진행되고 있다. 본 기사에서는 PSC거더 중에서 가장 최근인 97년 12월에 연구, 발표된 New England 벌브티에 대해 "Design, Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder" by PCI JOURNAL(p.30~p.40)지의 기사를 인용하여 소개하고자 한다.

\* 정회원 아주대학교 토목설계공학과 부교수

\*\* 아주대학교 토목설계공학과 석사과정

### 1.서론

PCI(Precast/Prestressed Concrete Institute) New England Technical Committee for Bridges 라는 위원회는 New England 지방의 민관합동 단체로 지난 수십년간 New England 지방의 교량 건설에 많은 영향을 미쳐왔다. New England 지방은 그 독립성과 개성으로 잘 알려져 있고, 그 개혁정신은 정치, 교육 및 민간 산업부문에서도 잘 나타나고 있다. 이 단체는 New England 지방의 6개의 주 즉, 코네티컷, 메인, 메사추세츠, 뉴햄프셔, 로드 아일랜드 그리고 버몬트의 콘크리트 교량에 대한 문제 해결을 위하여 구성되었다. New England 지방의 총 인구는 천2백만이며 지리적으로는 175028km<sup>2</sup>에 달한다.

이 새로운 벌브티 거더는 초기의 착안에서 설

계표준으로 받아들여지면서 2년 전부터 실제 설계와 시공에 적용되었다. 이렇게 되기까지 이 위원회는 지역의 환경에 따른 제작조건과 부재 생산자들의 생산과 관련된 문제점 그리고 향후 예상되는 요구 사항들을 이 거더의 설계에 잘 조화시켜야 했다.

어떤 모임이든지 간에 그 구성원들에 의한 협동으로 문제에 접근하는 것이 그저 한 사람이 결정을 내리고 다른 사람들은 따라가기만 하는 것보다 낫다는 것이 기본 원칙이다. 하지만 전통적으로는 교량의 설계 및 시공에 있어서 후자 쪽을 따라온 것이 현실이다.

교량 건설에 있어서 그림 1에 나타나 있듯이 주 도로국(State Highway Department)에서 정한 사항들에 의해 설계사들이 설계를 하고 문제가 있으면 다시 도로국에 문의를 하고 그 다음에 제작진에 맡겨지는 것이 관례였다. 또 이 과정에서 제작진은 제작과정에서 문제가 생겼을 때 설계사에 다시 의뢰를 하게 되고 설계사는 다시 도로국에 문제를 제기하게 되는 과정이 반복되어 진다. 이러한 체제하에서는 도로국이 결국 모든 결정권한을 가지고 교량 건설을 진행하게 되는데, 도로국 혼자서 건설에 사용되는 재료와 건설 방법의 빠른 변화에 대처하기에는 무리가 있다.

그림 2에 나와 있듯이 상호협동 체제하에서는 개개의 구성원이 서로 동등한 결정권한을 가지게 된다. 그렇게 되면 서로의 의견을 반영하면서 효과적인 해결이 보다 신속하게 이루어질 수 있다. 이것이 NETC (PCI New England

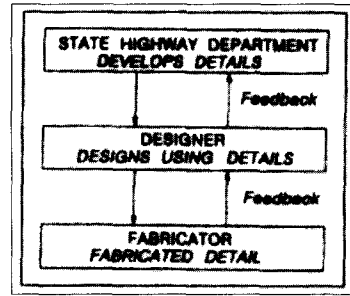


그림 1 세부 사항 설계의 전통적인 접근 절차

Technical Committee)의 기본 정신이다. 이 위원회가 효과적으로 돌아가게 되는데는 2년여의 기간이 걸렸는데 여기에는 구성원의 상호간 믿음과 친분관계가 절대적으로 필요하였다. 특히 도로국의 동등한 위치에서의 참여가 없었더라면 어떠한 결과도 기대할 수 없었을 것이다.

## 2. PCI New England Technical Committee(NETC)

NETC는 1978년에 프리캐스트 콘크리트 제작자들에 의해 콘크리트 제품들의 향상을 위해 설립되었다. 그 당시 위원회의 주 활동은 빌딩이나 주차 건물등에 쓰이는 부재들의 개발에 제한되어 있었다. 이 위원회가 교량에 쓰이는 빔 부재에 관심을 가지기 시작한 것은 1980년대 초에 들어와서이다. 하지만 불행하게도 위원회가 새로 연구한

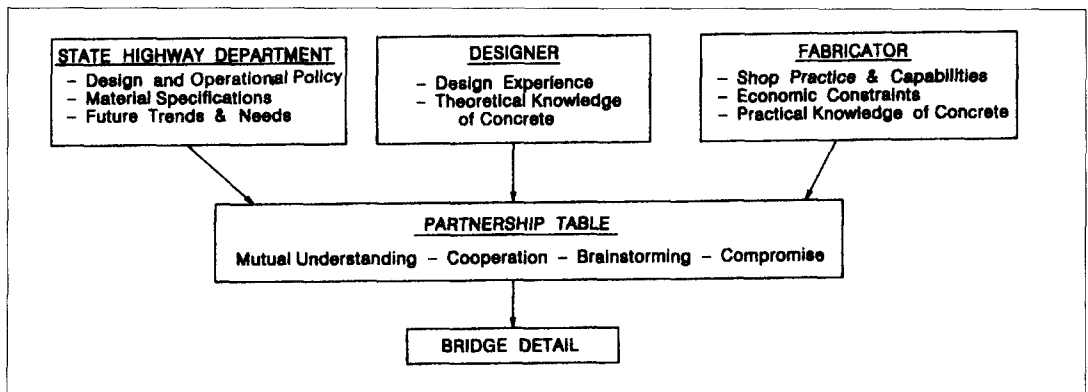


그림 2 교량의 세부사항을 결정하는데 있어서 상호 협동하는 방법상의 절차

사항들을 도로국에 제출하였을 때 메사추세츠 주의 시방서에 어긋난다는 이유로 기각이 되어 더 이상 이 문제를 거론하지 않게 되었다. 1989년 들어 도로국에 새로운 세대가 들어서면서 도로국의 엔지니어들은 메사추세츠주의 시방서와 실제 산업에 쓰이는 것과의 차이를 인식하게 되었다. 그들은 주의 standard가 AASHTO의 규정과도 다르다는 것을 발견했다. 이 시기에 메사추세츠 주의 교량 설계사 Paul Sullivan은 새로운 시방서가 필요하다고 인식하고 NETC의 새로운 마케팅 담당자 Rita Seraderian의 도움을 받아 도로국이 NETC에 가입하도록 하게 하였다. 이 위원회에 메사추세츠주가 처음으로 1990년에 가입하게 되었다. 로드 아일랜드와 코네티컷은 1991년에 가입하였다.

이러한 가입에 힘입어 위원회는 전에 덮여 두었던 바닥판과 박스빔에 관한 세부 사항들을 재조정하여 1992년에는 코네티컷 DOT 그리고 1993년에는 로드 아일랜드 DOT 마지막으로 1994년에는 메사추세츠 도로국의 새로운 시방서를 만들게 되었다. 이 과정에서 중요한 것은 세 개의 주가 모두 같은 시방서를 규정하였다는 것이다. 이것은 상업적으로 프리캐스터들이 세 주에 모두 상품을 납품할 수 있게 되었다는 것을 뜻한다.

이 위원회는 1993년에서 1994년에 걸쳐 나머지 New England 지방의 3개 주가 참여하게 되면서 발전하기 시작하였고, 이 주들도 역시 같은 시방서를 규정함으로써 이 지역 전체가 통일된 시방서를 가지게 되었다.

### 3. Why Develop the Bulb-tee Girder?

위의 사항들에 대한 규정을 개정하고 위원회는 과연 존속할 것인지 아니면 계속할 것인지에 관한 문제에 직면하게 되었다. 이에 위원회는 계속하기로 야심차게 의결했지만 다음에는 무엇을 할 것인지가 관건이 되었다.

이 때 New England의 시방서가 물론 AASHTO I 거더였지만 더 긴 시간의 필요성이 증대됨에 따라 이에 대한 연구를 시작하게 되었

다. 물론 강교가 New England 지방의 대부분의 시장을 석권하고 있는 상태여서였다.

위원회는 벌브티 거더 등의 새로운 단면형상과 포스트텐션닝의 도입등을 통한 지방환경에 어울리는 그리고 미래의 수요에 충족할 만한 거더의 개발을 도모하게 되었다. 물론 강구조와 경쟁 가능한 거더의 제작이 목표가 되었다.

## 4. Constraints of the New England Environment

New England 지방의 거더는 두가지 상반된 조건들을 만족해야 한다. 하나는 거더의 높이와 무게가 최소화 되어야 하는 것이고 나머지 하나는 고속도로 조건상 보다 더 긴 스패를 사용해야 하는 것이다.

### 4.1 거더의 높이에 관한 제한 조건

New England 지방은 미국에서도 가장 오래된 고속도로망을 갖추고 있는 지방중의 하나이다. 때문에 기존의 우마를 대상으로 건설되었던 교량들을 이제 교체할 시기가 되었다. 그 당시 주로 철로 위를 지나기 위한 교량들을 새로 교체하는데 있어 여러 문제점들이 있다. 예전에는 그저 건설하기 쉽게 거더 길이가 짧아도 되었지만 지금은 우마차 보다 차량들을 대상으로 교체하는 것이니 만큼 제약 조건들이 많아지게 되었다. 우선 높이가 높아진 열차 차량들로 인해 거더의 높이가 낮아져야 하는 것과 높이가 높아진 차량들로 인해 가능한 얇은 구조물이 필요하게 된 것이다.

### 4.2 운반, 가설상의 제한 조건

대부분의 도로에서 거더를 수송하는데 있어 회전반경상에 문제가 있다. 게다가 거더의 자중이 너무 무거워도 도로와 교량 위를 운반하는데 문제가 있기 때문에 무게를 줄이는 것도 굉장히 중요하다. 아울러 거더를 들어올릴 크레인 역시 무거운 것은 운반상에 문제가 있으므로 그 무게가 작아지고 크기 또한 작아져야 한다.

### 4.3 도로설계 조건

구불구불한 도로를 직선화하는데 역시 긴 길이의 거더가 필요하다. 교량 아래의 도로도 역시 안전상 넓은 시야 공간이 필요하고 환경에 미치는 영향을 불때도 교각의 수를 줄이는 것이 바람직하다. 이러한 이유들로 교량 설계사들은 보다 긴 시간의 거더를 필요로 한다.

## 5. Developing the NE Bulb-tee Girder

놀랍게도 New England 벌브티 거더 개발의 기본적인 사항들은 1994년 3월 2일 단 하루만에 결정이 되었다. 그날의 첫 모임에서 위원회 위원들은 기존의 프리캐스트 거더의 시방서들을 검토하고 나서 New England 벌브티 거더의 치수들과 단면 모양을 결정했던 것이다.

### 5.1 거더의 단면

위원회는 그림3에 나와있듯이 New England 지방에 적합한 거더가 되기 위해서는 지간길이 38.10m, 최고 높이 1.83m 그리고 거더간격이 2.44~2.74m가 되어야 한다고 결정하였다. 위원회는 미래에는 긴 지간의 교량이 필요할 것 같아 이와 같이 결정을 하고 나아가 프리캐스트 거더의 복부가 포스트텐션용 덕트를 수용할 정도의 폭을 갖아야 한다고 규정하였다.

거더의 길이를 33.53~38.10m로 정한 것은 New England 지방 도로망의 수송 가능성을 고려한 것이고 최대 높이와 거더 간격은 미국에서

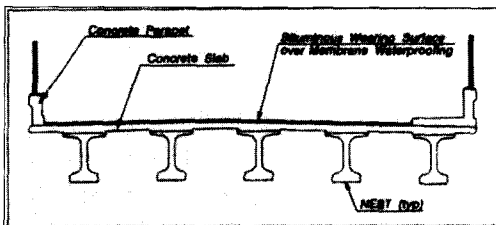


그림 3 2차선 New England 벌브티 거더 교량의 대표적인 단면

쓰이고 있는 여타 교량과 비교하여 나온 값이다.

### 5.2 기존 시방서의 검토

다음으로 위원회는 최근 미국에서 건설된 프리캐스트 거더들을 검토해 보았다. 사다리꼴형 단면이 먼저 검토되었는데 그것은 그 미적인 측면과 곡선교에서의 유리함 때문이었다. 하지만 그 크기와 무게 때문에 운반이 어렵고 지간 길이를 맞출 수 없어서 검토 대상에서 제외되었다.

위원회는 벌브티 단면이 위에서 준 조건들을 만족하기에 가장 적합할 것이라고 결정하였다. 이 결정은 이전에 나왔던 모든 벌브티 거더들 예를 들어 Florida, Kentucky, PCI 그리고 최근의 NU벌브티 거더들을 검토해 보고 강교와 비교해 가장 경제성이 있다고 판단되어 합의된 것이다.

위의 대부분의 예들이 장점이 많긴 했지만 위원회의 요구 조건에 정확히 부합하는 것은 없었다. NU 거더가 넓고 얇은 아래 벌브 때문에 좋게 평가되기는 했지만 프리캐스터들이 콘크리트 타설시에 벌브에 모두 채울수 있을지에 의문을 제기했다.

### 5.3 New England Bulb-tee Girder의 개발

이 검토를 마친 후에 위원회는 New England 지방에 맞는 모든 조건들을 만족시킬 벌브티 거더를 찾지 못하고 스스로 개발기로 결정했다. NEBT로 명명된 이 벌브티 거더는 기존의 모든 벌브티 거더들의 장점을 수용하는 동시에 제시된 제약 조건들을 만족시키고 더 나아가 AASHTO I 거더를 표준으로 삼고 있는 지역의 시방서를 대체하기로 결정하였다. 단면결정에 있어서 Florida 벌브티 단면이 도입되었는데 큰 곡률이 미관상 아름답고 등지를 트는 새들에게 유리하기 때문에 결정되었다.

### 5.4 미터법의 사용

미래에 사용될 미터 단위에 대비해 프리캐스트

부재 생산자들은 이 새로운 형상의 거더 단면에 미터 단위를 도입했다. 위원회에서 정한 기본적인 상부 플랜지 형상은 폭 1200mm(47.24 in.) 두께 85mm이다.

아래 벌브는 폭 710mm 두께 200mm에 경사진 부분 100mm 높이에 120mm 코너반경을 두었다. 이 벌브는 42가닥의 프리텐션 강선을 포함할 수 있다.

웹의 폭이 위원회 위원들 사이에서 가장 논의의 대상이 되었었는데, 이것은 프리텐션의 경우 자중을 줄이기 위한 얇은 웹이 필요한 대신 장기적으로 볼 때 포스트텐션이 standard가 될 경우 보다 두꺼운 웹이 필요로 하기 때문이었다.

다른 주들의 경우에는 프리텐션과 포스트텐션 부재별로 각각의 표준단면이 있는데 반해 위원회는 통일된 단면이 설계와 시공을 간편화 할 수 있다는데 역점을 두고 통일하기로 하였다. 이러한 이유로 웹의 폭은 180mm로 결정이 되었고 웹의 높이는 변수로 두었다. 이것은 단면에서 상부 플랜지와 하부 벌브는 고정시키고 높이만 결정하게끔 한 것이다.

거더의 웹 높이는 기본값으로 1200, 1400, 1600 그리고 1800mm의 네 값을 설정하였는데 이것은 AASHTO type III에서 type VI까지의 거더들과 동일한 것이다. 이 당시 얇은 거더 높이는 고려되지 않았는데 그것은 얇은 거더 사용할 때에는 박스 거더가 보통 사용되고 있었기 때문이다. 위원회는 웹의 높이가 1000mm짜리가 필요하다고 판단해서 1995년 5월 16일에 추가하였다.

### 5.5 초기세부 설계

가장 먼저 메사추세츠 도로국에서 제시한 제한 조건을 만족하는 가장 많은 강선을 배치할 수 있는 단면의 세부 설계를 제시하였다.

## 6. Independent Riviews

New England 벌브티 단면에 대한 독자적인 검토가 Nebraska 대학과 포틀랜드 시멘트사에

의해서 실시되었다.

## 6.1 University of Nebraska

1994년 7월 모임 이후 위원회는 개발된 벌브티 단면에 대한 검토를 NU벌브티 거더의 개발자인 Nebraska 대학의 Mather Tadros 교수에게 처음으로 의뢰하였다. Tadros 교수는 NEBT 단면과 NU 단면 비교 이후 몇가지 의견을 내놓았는데, 그 의견이 받아들여져 프리텐션 강선의 개수를 늘리기 위해 하부 벌브의 폭을 710에서 810mm로 웹의 높이는 200에서 210mm로 늘리게 되었다.

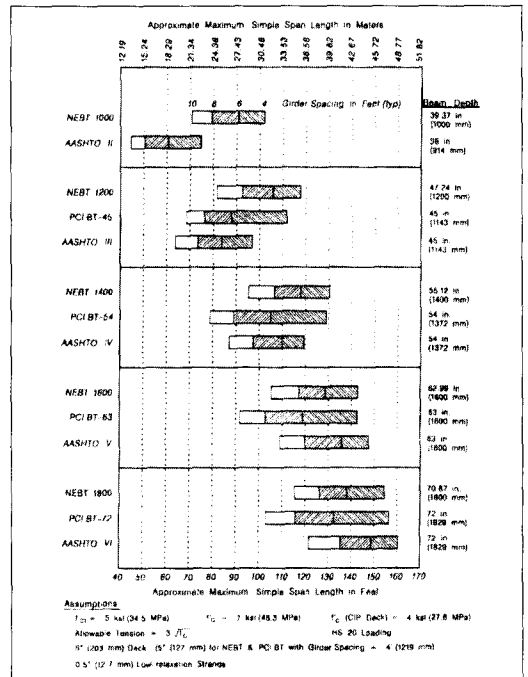


그림 4 New England 벌브티 거더와 PCI 벌브티 거더 그리고 AASHTO I 거더의 길이 비교

## 6.2 Portland Cement Association

그 다음으로 포틀랜드 시멘트사에 당시 일하던 Reid Castrodale에게 또 다시 독립적인 검토가 맡겨졌다. Castrodale 박사는 NEBT 단면과 AASHTO I형 거더 그리고 PCI 벌브티 거더를

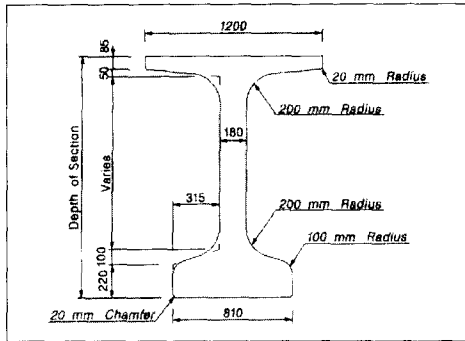


그림 5 NEBT 거더의 단면

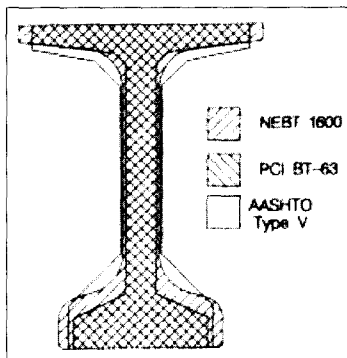


그림 6 New England 벌브티와 기타 단면들 간의 비교

Beam Designation	Depth (mm)	Area (mm <sup>2</sup> × 10 <sup>3</sup> )	Centroid to Bottom (mm)	Moment of Inertia (mm <sup>4</sup> × 10 <sup>8</sup> )	Section Modulus (Top) (mm <sup>3</sup> × 10 <sup>6</sup> )	Section Modulus (Bot.) (mm <sup>3</sup> × 10 <sup>6</sup> )	Weight (kN/m)
NEBT 1000	1000	481	483.2	82.1	120.163	128.518	11.34
NEBT 1200	1200	517	574.6	98.1	158.509	172.408	12.10
NEBT 1400	1400	553	667.3	146.5	190.945	219.541	13.04
NEBT 1600	1600	589	760.0	204.6	244.071	269.155	13.89
NEBT 1800	1800	625	855.1	274.9	290.800	321.483	14.74

그림 7 New England 벌브티의 단면 제원들

비교 분석한 결과가 그림 4에 나타나 있다. 이 결과 위원회는 다시 하부 벌브의 폭을 210에서 220mm로 늘이고 모서리 반경을 120에서 100mm로 그림 5에 보이는 것과 같이 줄였다.

이 하부 벌브는 52개의 프리텐션 강선을 포함하면서 충분한 바닥 피복 두께를 확보한 것이다. 그림 6에 NEBT 1600과 PCI BT-63 그리고 AASHTO type V 거더의 형상을 비

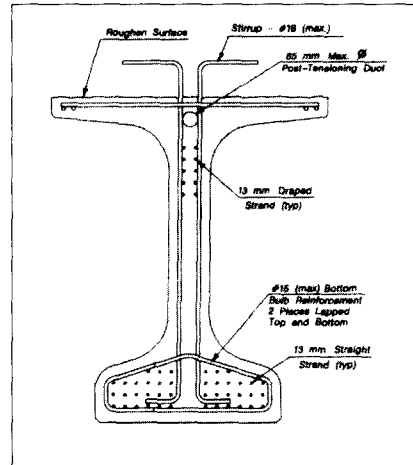


그림 8 전단철근 배치된 벌브티 단면 형상

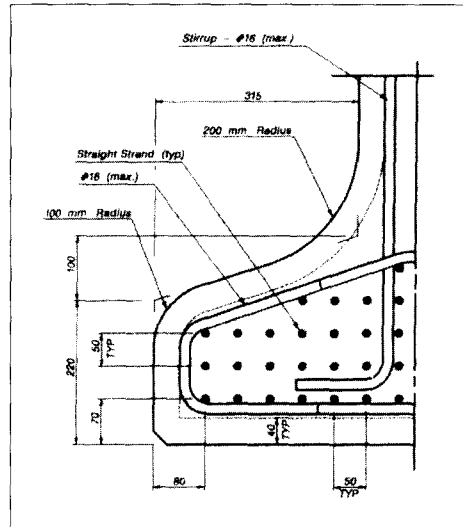


그림 9 하부 벌브의 설계

교해 놓았다. NEBT 시리즈의 단면계수들은 그림 7에 제시되어 있다.

그림 8에는 벌브티 단면과 전단철근의 배치 그리고 프리텐션 강선의 배치와 포스트 텐션용 덕트의 배치가 제시되어 있다.

위원회 위원들간에 벌브티 거더의 내구성에 관한 문제가 주요 화제로 떠올랐는데, 검토 결과 적절한 피복 두께 등은 그림 9에 제시되어 있다. 여기서 볼 수 있듯이 전형적인 벌브의 피복은 40mm이다.

## 7. The Boston Central Artery Project

위원회가 NEBT를 개발하고 있는 동안 CAT(Boston's Central Artery/Third Harbor Tunnel)의 직원들도 나름대로 프로젝트에 쓰일 벌브티 거터를 물색하고 있었다. CAT는 메사추세츠 도로국에서 나온 기관이었고 메사추세츠 도로국이 NEBT가 완성되는데로 실무에 적용하려 하고 있었으므로 NEBT를 쓰기로 결정하였다. 따라서 West Service Extension 위를 지나는 Summer Street Bridge가 NEBT 거터의 첫 번째 적용 프로젝트가 되었다.

### 7.1 설계

이 프로젝트는 단순교로 길이 18.6m 폭 30.5m의 교량으로 거터 간격은 2.4에서 2.9m이다. 이 교량의 하부구조는 프리캐스트 교대를 사용하여, 큰 침하에 적응할 수 있도록 하였다.

설계사들은 근처의 터널 공사로 지반의 안정을 고려하였는데, 프리캐스트 벽면이 이를 해결해 주었다. 이 교량은 일체식의 교대가 양쪽에 필요하였고, 거터 높이 1200mm의 단면을 선택하였다. NEBT는 원래 미터법의 단면을 설계하였는데 Central Artery 프로젝트에서는 U.S 단위를 채택하였다.

### 7.2 거터의 제작

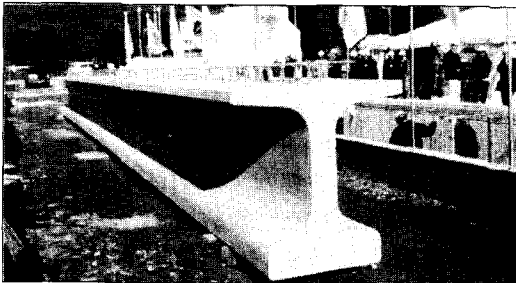


그림 10 New England 벌브티 거터 사진

이 프로젝트는 메사추세츠 캠브리지에 있는 Modern Continental Construction의 기술자와 메사추세츠 플랜빌에 있는 Northeast Concrete Products에 거터의 제작이 맡겨졌다. Northeast Concrete사는 어떤 타입의 거꾸집을 제작하여 사용할 것인가에 관한 연구를 수행하고 두 조각으로 된 거꾸집을 채택했다. 그 이유는 다음과 같다.

1. 작업 시간과 노동량을 줄일 수 있고 조장이 쉽다.
2. 눈에 보이는 접합선이 한 개 뿐이다.
3. 두 조각으로 된 것이 좀 더 비싸긴 하지만 긴 시간에 더 유리하다.

거터의 제작에는 10주의 시간이 걸렸고 1996년 12월에 2주 간격으로 제작되었다. 거터 제작에는 type III 시멘트가 사용되었다.

그림 10에는 처음으로 제작된 NEBT가 나타나 있다.

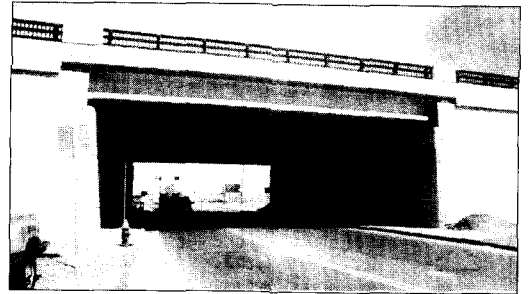


그림 11 메사추세츠 보스턴에 있는 West Service Road 위를 가로지르는 완성된 Summer Street Bridge

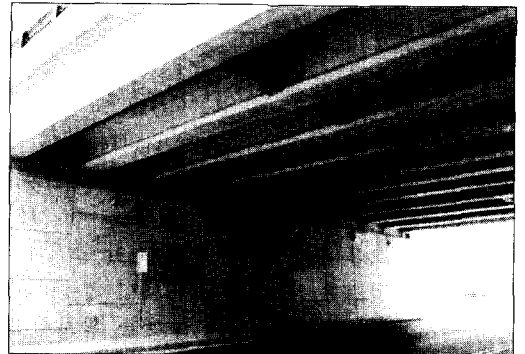


그림 12 New England 벌브티의 교대와 세부사항을 볼 수 있는 Summer Street Bridge의 아래에서 본 사진

### 7.3 건설

첫 번째 운반은 1997년 3월에 두 번째는 5월에 이루어졌고 8월에 완공되었다. 완성된 교량은 그림 11과 12에 나와 있다.

## 8. New Project

첫 번째 NEBT가 성공적으로 건조된 이후 4번의 프로젝트가 더 있었다.

두번째는 New Hampshire에 New Hampshire 도로국에 의해 진행되었다. 이 공사는 John River를 가로지르는 135번 국도에 건설된 다리로 1400mm 높이의 단면을 사용하였다. 이 공사의 프리캐스터는 J.P.Carrar와 버몬트의 Sons of Middlebury사로 1997년 6월에 거더가 만들어져 1997년 9월에 착공하였다.

세 번째 NEBT의 사용은 Connecticut주에서 있었는데 STV에 의해 설계되어졌다. 이 공사에서는 거더 높이 1000mm의 단면이 채택되어 Bridgeport에 있는 I-95에 건설되었다. 거더들은 Blakeslee Prestress사에 의해 건설되어져 1998년 봄에 착공할 계획에 있다.

네 번째 프로젝트는 HDR 엔지니어링에 의해 설계되어 메사추세츠 도로국에 의해 시행될 예정이다. 이 공사는 거더의 높이 1600mm 거더가

채택되었다. 여기에 쓰일 거더들은 Northeast Concrete사에 의해 1998년 봄에 제작될 예정이다.

이 외에도 여러 프로젝트가 진행중이며 벌브티의 개발 증진을 위해 연구중에 있다.

## 9. Concluding Remarks

PCI New England Technical Committee는 8년간 함께 NEBT에 관해 일해 왔다. 팀워크는 거의 완벽했다고 평가되어지고 있다. 같이 일한 이 짧은 기간 동안 위원회는 교량건설에 많은 영향을 미쳤고 연구되어진 교량들은 지금도 건설되고 있고 미래에도 그럴 것이다. New England 벌브티 거더가 지금까지는 위원회의 유일한 성과이다. 위원회는 앞으로도 지역의 프리캐스트 콘크리트 교량의 시방서를 보다 발전시키기 위해 일할 것이다.

메사추세츠와 코네티컷 주는 지금도 벌브티 거더의 시방서를 세우기 위해 노력중이며 일단 시방서가 규정되어지면 AASHTO 거더는 더 이상 사용되지 않을 것이다.

위원회는 앞으로도 벌브티 거더의 발전은 물론 교량에 관련된 다른 분야에도 연구를 계속할 예정이며 무엇보다도 상호협동에 의한 문제해결이 가장 최선의 방법임을 입증한 계기가 되었다. 