

변단면 PC-빔 연속화 방안에 관한 연구 최종보고서

2010. 11. 17.

주관연구기관 / (주)에 이 스 이 엔 씨
협동연구기관 / (주)한국해외기술공사

Land Transport and Maritime R&D Report

변단면 PC-빔 연속화 방안에 관한 연구 최종보고서

2010

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 “변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2010년 11월 17일

주관연구기관명 : (주) 에이스이엔씨

주관연구책임자 : 김 철 호

연구원 : 전 혜 관

연구원 : 이 준 수

연구원 : 김 동 조

연구원 : 최 문 수

협동연구기관명 : (주) 한국해외기술공사

협동연구책임자 : 송 영 봉

보고서 요약서

과제고유번호	R&D/ 09TRPI -C052747-01	해 당 단 계 연 구 기 간	2009. 12. 8. ~ 2010. 8. 7	단 계 구 분	(2차년도) / (2차년도)
연 구 사 업 명	중 사 업 명	건설교통 R&D 정책 · 인프라사업			
	세부사업명	창업 사업화			
연 구 과 제 명	대 과 제 명				
	세부과제명	변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구			
연 구 책 임 자	김 철 호	해당단계 참 여 연구원수	총 : 9 명 내부 : 5 명 외부 : 4 명	해당단계 연 구 비	정부 : 140,250천원 기업 : 277,963천원 계 : 418,213천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 9 명 내부 : 5 명 외부 : 4 명	총연구비	정부 : 200,000천원 기업 : 446,315천원 계 : 646,315천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	(주) 에이스이엔씨 기술연구소		참여기업명	(주) 한국해외기술공사	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요 약				보고서면수	
본 연구는 PC-빔의 보다 넓은 활용을 위하여 구조적 성능 향상을 통한 장경간화와 함께 미적으로 개선된 새로운 형상으로 개발된 변단면 PC-빔에 대하여 연속화 방안에 대한 연구와 더불어 연속지점부의 받침의 합리적인 방안에 대해 이론적, 실험적 연구로 진행하였다. PC-빔 교량에 발생될 수 있는 횡 균열은 구조적으로는 문제가 되지 않지만 바닥판 자체를 조기에 손상시킬 가능성은 배제할 수 없으므로 기존 연구 및 외국의 사례들을 조사하고, 적절하고 독창적인 변단면 PC-빔의 연속화 방안과 합리적인 교량받침의 연구는 구조적 안정성과 경제성을 향상의 두 가지 장점을 모두 얻을 수 있는 연속교로서의 필수조건이다. 이론적 연구를 통해 합리적인 연속화 방안을 도출하였고, 이에 대한 구조적 안정성 및 현장적용성에 대한 검증차원으로 실험교량 재하시험을 실시하였으며, 그 결과 타공법 대비 경제적이며, 구조적 효과가 뛰어남을 확인하였으며, 연속지점부 받침부의 합리적인 방안으로 시공성과 경제성을 겸비한 교좌장치를 개발을 하여 현장적용에 따른 문제점 및 개선방안을 도출하기 위해 실험을 실시하였다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	변단면, 프리스트레스트 콘크리트, 빔, 경제적, 미관			
	영 어	Variable, PSC, Beam, Economic, Fine view			

요 약 문

I. 제 목

변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구개발은 교량의 상부구조 형식으로 널리 사용되고 있는 PC-빔의 시공기술과 관련된 것이다. PC-빔은 경제적이면서도 간편한 시공성을 장점으로 한 도로교 및 철도교량의 대표적인 상부구조 형식이나 경간장의 제약과 함께 불량한 미관으로 인하여 폭 넓은 적용에는 한계가 있는 실정이다.

이에 본 연구는 변단면 PC-빔 연속교에 있어서 PC-빔 교량에 발생하고 있는 바닥판 횡균열을 억제할 수 있는 방안과 합리적인 교량받침의 설계와 사용성을 연구함으로써 기존 PC-빔의 문제점들을 가장 효과적으로 제어하는 이론적 연구와 실험적 연구를 통해 변단면 PC-빔의 활용범위를 넓히는데 있다.

단순교인 경우에는 일반적으로 경간이 35m 이하로 제한되며, 이 보다 경간이 더 긴 경우에는 강교가 주로 사용된다. 만약 합리적인 연속화 공법이 제시된다면 60m까지의 경간에 대해서도 PC-빔교를 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 기존 PC-빔의 연속화 방법에 대한 검토와 합리적인 연속화 방법에 대한 연구가 절실하다.

PC-빔 교량에 발생될 수 있는 횡 균열은 구조적으로는 문제가 되지 않지만 바닥판 자체를 조기에 손상시킬 가능성은 배제할 수 없으므로 기존 연구 및 외국의 사례들을 조사하고, 적절하고 독창적인 변단면 PC-빔의 연속화 방안과 합리적인 교량받침의 연구는 구조적 안정성과 경제성을 향상의 두 가지 장점을 모두 얻을 수 있는 연속교로서의 필수조건이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구의 내용은 국내에서 사용되어 온 이러한 연속화 방법이 PSC 빔 교량의 연결부 바닥판에 예외 없이 횡 균열을 발생시킨다는 지적에 따라 이를 해결하고 더 나아가 변단면 PC-빔만의 합리적인 연속화 공법을 개발하여 경제성을 향상시키는 것을 목적으로 한 이론적 연구이다.

본 연구개발의 성과지표로는 변단면 PC-빔 연속교의 개발이다. 연구목표의 진행에 있어 빔 연결의 합리적인 방안 연구를 통해 이론적인 근거를 마련하고, 이를 근거로 상세구조 해석을 통해 타 공법과의 면밀한 분석을 통해 실교량에 적용이 가능한 지를 판단하고자 한다. 또한, 기존 연속화 방법과 비교하여 구조적 안정성을 충분히 확보하고도 간편한 시공성을 유지할 수 있는 시공방안을 마련할 예정이다.

이에 본 연구는 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대해 연구와 더불어 연속지점부의 받침의 합리적인 방안에 대해 이론적, 실험적 연구로 진행하였다.

연구 목표	주요 연구내용
변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대한 연구	▪ 기존 연속화 방법에 대한 비교 분석 ▪ 국내·외 연속화 사례에 대한 연구 ▪ 빔 연결의 합리적인 방법에 대한 연구
연속지점부 받침의 합리적 방안 연구	▪ 사례연구 및 문제점 해결을위한 방안 제시 ▪ 시작품 제작을 통한 이론적 연구 구현 ▪ 재하시험을 통한 적용성 검토

IV. 연구개발 결과

연 차	연 구 목 표	주요 연구내용
1차년도	▪ 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대한 이론적 연구	▪ 기존 연속화 방법에 대한 비교 분석 ▪ 국내·외 연속화 사례에 대한 연구
	▪ 합리적인 모델을 통한 시제품 제작	▪ 시제품 제작을 통한 이론적 연구 구현 ▪ 실시공 현장에 연속화 방안 적용
2차년도	▪ 이론적 연구를 근거로 한 실험적 연구	▪ 연속지점부 빔 연결의 합리적인 방법에 대한 실험적 연구(One Shoe System) ▪ 경제성 제고를 감안한 시공방법 도출
	▪ 실교량 연속화 계측 및 장기거동 계측	▪ 연속교 실험체 제작을 통한 시험분석 ▪ 실교량 계측을 통한 준공교량 실험

V. 연구개발결과의 활용계획

본 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구를 통해 사회적 요구에 부응하여 PC-빔의 시공, 경제적 장점에 더하여 수려한 미관으로 차별화를 극대화한 기술로서 종래 PC-빔 시장뿐만이 아니라 유사 거더 건설시장에 까지도 그 파급효과가 매우 큰 기술로서 그 전망과 활용이 긍정적일 것으로 예상된다. 그 동안 문제점으로 인식되던 PC-빔의 경간장 제약과 미관상 불량한 단점을 극복하여 개량된 기술로서 종래 PC-빔의 활용범위를 폭 넓게 함으로서 그 시장성을 키울 수 있다. 여기에 종래 PC-빔에서 문제로 인식되던 미관상 불량한 단점을 근본적으로 해결하여 일찍이 PC-빔에서 볼 수 없었던 미관상 장점을 더한 기술적 차별화로 보다 더 진보된 기술발전에 활용될 것이다.

SUMMARY

The girders of precast prestressed concrete bridges are essentially erected on simple supports at first construction stage. But structural continuity is usually provided to obtain some economical efficiency.

However, in most of the type of bridges, transverse deck cracking has been generated at vicinity of their interior supports and many questions on the durability have arose. The purpose of this study is to identify the problem and to develop a reasonable continuation method for the type of bridge for further improving the economical efficiency.

The suggested method is not a new technique. But, it is characterized by its optimized combination of tendon profiles and tensioning forces, and shape of girder section.

CONTENTS

Chapter 1. Summary of Research and Development Subject

1. Purpose of Research and Development	1
2. Necessity of Research and Development	2
3. Contents and Extent of Research	4

Chapter 2. Situation of Internal and External Technique

1. Industry trend and Technique development of internal	7
2. Industry trend and Technique development of external	18
3. Position in situation of internal and external	18

Chapter 3. Contents and Result of Research and Development Study

1. Theoretical research about continuous plan of APC BEAM	21
2. Experimental research about continuous plan of APC BEAM	56

Chapter 4. Object achievement and Contribution of relation fields

1. Object achievement	87
2. Contribution of relation fields	93

Chapter 5. Application scheme of Research and Development results

1. Application scheme of Research and Development results	97
2. Expectation effects of Research and Development results	99
3. Application results of APC BEAM	104

Chapter 6. Reference 111

목 차

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적	1
2. 연구개발의 필요성	2
3. 연구내용 및 범위	4

제2장 국내외 기술개발 현황

1. 국내 산업동향 및 기술개발현황	7
2. 국외 산업동향 및 기술개발현황	18
3. 국내외 기술개발 현황에서 차지하는 위치	18

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대한 이론적 연구	21
2. 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대한 실험적 연구	56

제4장 목표달성도 및 관련분야의 기여도

1. 목표달성도	87
2. 관련분야에의 기여도	93

제5장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구개발결과의 활용방안	97
2. 연구개발결과의 기대효과	99
3. 변단면 PSC 빔의 활용실적	104

제6장 참 고 문 헌

111

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

본 연구개발은 교량의 상부구조 형식으로 널리 사용되고 있는 PC-빔의 시공기술과 관련된 것이다. PC-빔은 경제적이면서도 간편한 시공성을 장점으로 한 도로교 및 철도교량의 대표적인 상부구조 형식이나 경간장의 제약과 함께 불량한 미관으로 인하여 폭 넓은 적용에는 한계가 있는 실정이다.

PC-빔은 경제성과 시공성을 장점으로 하여 교량의 상부구조 형식으로 널리 사용되는 공법이나, 경간장의 한계와 함께 불량한 미관으로 그 적용에 제한이 있는 것이 사실이다.

이로 인하여 경간장이 길어지거나 미관이 고려되는 교량의 건설에 있어서는 부득이 고가의 강박스 거더나 PC-박스 거더, Preflex-빔 등이 사용되고 있는데 이로 인한 건설비용의 증가는 큰 부담이 아닐 수 없다.

이에 본 연구는 PC-빔의 보다 넓은 활용을 위하여 구조적 성능 향상을 통한 장경간화와 함께 미적으로 개선된 새로운 형상의 PC-빔 제작기술을 위하여 설계 매개변수 연구를 통한 단면의 합리적인 설계와 이를 통하여 기존 PC-빔의 활용범위를 넓히는데 있다.

단순교인 경우에는 일반적으로 경간이 35m 이하로 제한되며, 이 보다 경간이 더 긴 경우에는 강교가 주로 사용된다. 만약 합리적인 연속화 공법이 제시된다면 60m까지의 경간에 대해서도 PC-빔교를 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 기존 PC-빔의 연속화 방법에 대한 검토와 합리적인 연속화 방법에 대한 연구가 절실하다.

따라서, 본 연구개발은 변단면 PC-빔의 미적효과를 극대화 할 수 있는 연속교로서의 적용성을 높이기 위해 첫째, 연속지점부 부모멘트 제어를 위한 연속화 방안과 둘째, 기존 PC-빔에 있어서 교좌장치 2개 설치에 따른 비효율성 극복을 위한 교좌장치 1개 설치를 통한 연속지점부 받침의 합리화 방안에 대한 연구 성과 도출을 통해 경제적이고 합리적인 연속화 방안의 이론적 근거를 정립하고, 실험량 재하시험을 통한 구조적 안전성을 입증하여 실용화에 따른 객관적인 검증자료로서의 목적을 두고 있으며, 연속지점부의 시작품 및 실험체를 제작하여 실험을 통한 제품의 시공시 보완점 및 개선점을 찾고 검증하는데 목적을 두고 있다.

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

이에 본 연구는 PC-빔의 보다 넓은 활용을 위하여 구조적 성능 향상을 통한 장경간화와 함께 미적으로 개선된 새로운 형상의 PC-빔 제작기술을 위하여 설계 매개변수 연구를 통한 단면의 합리적인 설계와 이를 통하여 기존 PC-빔의 활용범위를 넓히는데 있다.

단순교인 경우에는 일반적으로 경간이 35m 이하로 제한되며, 이 보다 경간이 더 긴 경우에는 강교가 주로 사용된다. 만약 합리적인 연속화 공법이 제시된다면 50m까지의 경간에 대해서도 PC-빔교를 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 기존 PC-빔의 연속화 방법에 대한 검토와 합리적인 연속화 방법에 대한 연구가 절실하다. 본 연구개발은 그동안 많은 설계와 시공실적으로 널리 사용되고 있는 PC-빔의 적용범위를 더욱 넓혀 경제적이면서도 시공성이 좋은 PC-빔, 더욱이 미관까지 아름다운 PC-빔으로서 강박스 거더, PC-박스 거더, 프리플렉스 빔 등의 중·장경간장 까지 적용할 수 있는 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구이다.

나. 경제 · 산업적 측면

본 연구개발이 콘크리트 교량에 초점을 맞춘 이유는 경제, 산업적인 측면을 고려한 것이다. 현재까지 중, 소 교량에 있어서는 강재를 사용하는 강박스 교량이나 프리플렉스 교량들이 주로 적용되고 있다. 하지만, 최근 들어 중국을 비롯한 세계 여러 나라들의 산업화로 인해 철강을 비롯한 주요 자재들의 수요가 기하학적으로 늘어나게 되었고 이는 곧 원자재 값 상승으로 이어지고 있다.

최근 건설시장은 원자재 가격의 상승, 특히 강재 가격의 상승으로 경제성 제고를 통한 건설 예산의 절감이 주된 관심사이다. 이에 따라 중·소 교량 건설에 있어서 강박스 교량보다는 콘크리트교가 선호되는 추세이며 기 설계된 교량의 경우에도 실시 설계 단계에서 콘크리트 교량으로 교체되고 있는 실정이다.

지금까지, 국내·외적으로 다양한 형태의 저형고, 장경간 신기술 PC-빔 등이 개발되고 있으며, 고강도 콘크리트의 개발과 활발한 작용으로 인해 장경간 PC-빔의 개발에 탄력이 붙고 있는 실정이다.

다. 사회 · 문화적 측면

한편, 최근 들어 교량의 건설에 있어서도 경관설계에 대한 요구가 많아지고 있는데, 특히 각종 신도시 건설을 포함한 도심지에 건설되는 교량이나 경전철, 기타 국도나 고속도로에 있어서도 기왕이면 주변 경관과 잘 어울리는 교량형식을 선호하는 것은 지극히 당연하다 할 수 있다.

이에 본 연구개발은 사회, 문화적 측면에서 볼 때 PC-빔의 경제적 장점을 확보 하면서 기존 어떤 형식의 거더와도 차별화 되도록 단면 변화를 줌으로서 수려한 미관을 갖도록 하는 기술로서 경제성 및 시공성, 미관상 장점을 핵심 경쟁요인으로 하여 충분히 국가 정책방향에 이바지하는 교량 형식으로 발돋움 할 수 있기에 연구의 중요성을 가지고 있다.

3. 연구내용 및 범위

PC-빔 (Precast Prestressed concrete beam girder) 교량은 1950년대 초반 미국에서 처음으로 건설되기 시작했다. 초기 몇 년간은 다양한 형태의 단면들이 시도 되었으나 주형을 매번 개별적으로 설계한다는 것이 불필요하다는 생각에 따라 1956년 미국의 연방도로국(Bureau of Public Roads)이 AASHTO 거더로 불리우는 표준 단면을 제시하여 표준화된 주형이 사용되었다. 그 후 PC-빔의 건설은 세계적으로 널리 확산되어 현재에는 중, 소경간장 교량에 가장 보편적으로 사용되는 형식으로 자리 잡게 되었다. 국내에는 1960년대 말에 처음으로 도입되었으며 현재에는 고속도로의 경우 공용 중에 있는 콘크리트 교량 중 약 28%가 PC-빔 교량일 정도로 널리 사용되고 있다.

국내에서 주로 사용되고 있는 PC-빔은 도로공사에서 제시한 표준 주형으로서 ASHTO 주형을 기준으로 국내 실정에 맞게 수정된 형식이다.

주형이 프리캐스트 부재인 만큼 1960년대 전반기까지 PC-빔 교량은 단순교로 시공되었다. 그러나, 단순교는 많은 신축이음으로 인하여 주행 차량의 승차감이 나쁠 뿐만 아니라 신축이음을 통한 누수로 인해 주형 단부와 하부구조에 손상이 발생할 수 있고 신축이음 자체의 유지관리에도 많은 비용이 소요되게 된다.

이러한 단점을 개선하기 위하여 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구들이 이루어져 왔으며, 다양한 형식의 연속화 방법이 제안되어 사용되어 왔다.

국내에서 사용되어 온 연속화 방법은 연결부 상세에 따라 크게 2종류로 나눌 수 있다.

첫 번째는 바닥판만을 연속화 하는 방법이고, 두 번째는 바닥판과 주형을 모두 연속화 하는 방법이다.

첫 번째 방법은 연속화 공법을 도입하기 시작한 시점부터 1980년대 초반까지 사용되었고, 두 번째 방법은 1980년대 중후반부터 지금까지 사용되어 왔다.

신축이음 장치의 개수를 줄임으로써 주행성과 유지관리비를 절감하는 것을 주 목적으로 한 방법인데, 바닥판의 휨 강성이 매우 작기 때문에 교량은 사실상 단순교 거동을 하게 된다. 즉, 바닥판만 연속화한 단순교이다.

두 번째 방법은 바닥판과 주형을 모두 연결함에 따라 외견상으로는 연속교로 보이지만 연결부 바닥판과 주형 연결콘크리트에 완전한 관통 균열이 발생하기 때문에 사용하중 상태에서 거의 단순교로 거동하는 것으로 파악되고 있다.

연결부의 상세 차이에 따라 이렇게 두 방법으로 구분하기도 하지만 결과적으로 두 방법 모두 바닥판에 휨 균열을 발생시키고 사용하중 하에서 단순교로 거동한다는 점에서 동일한 방법으로 분류되고 있다.

본 연구의 내용은 국내에서 사용되어 온 이러한 연속화 방법이 PSC 빔 교량의 연결부 바닥판에 예외 없이 휨 균열을 발생시킨다는 지적에 따라 이를 해결하고 더 나아가 변단면 PC-빔만의 합리적인 연속화 공법을 개발하여 경제성을 향상시키는 것을 목적으로 한 이론 및 실험적 연구이다.

제2장 국내외 기술개발 현황

1. 국내 산업동향 및 기술개발 현황

가. 국내 산업동향

국토해양부는 고속도로, 일반국도, 지방도 등 전국 도로상의 교량 및 터널에 대한 기초현황과 통계자료를 수록한 “2008년도 도로교통 및 터널 현황조서”를 발표했다. 2008년 현황조서에는 2007년 말 시점으로 국내의 모든 교량과 터널에 대한 연장, 폭, 준공년도, 구조물 형식 등에 대한 세부내역이 수록되어 있다.

현황조서는 민간업체에서 현재 교량 및 터널의 건설현황을 파악하여 교량 및 터널의 설계, 시공할 때 참고자료로 이용할 수 있으며, 공공분야에서 구조물의 설계 및 유지관리 등 장래계획을 수립하는데 중요한 국가 기본 자료로 활용하기 위하여 작성된 것이다.

2008년 현황조서를 바탕으로 국내의 교량 건설에 대한 일반 현황을 살펴보면 다음과 같다. 지난해 말 기준으로 전국 교량은 전년대비 1,118개가 증가해 24,923개(연장 2,289 Km)가 되었으며, 전체적으로 빠른 증가를 보이고 있는 것으로 나타났다. 1987년에는 12,181개, 1997년에는 14,939개인 교량 개수는 작년 말에 24,923개로 조사되어 불과 10년 만에 약 10,000개, 67%의 증가율을 나타냈다.



[표 2.1.1] 교량건설 현황

도로의 종류별로 교량의 분포를 살펴보면, 고속국도 6,882개(27.6%), 일반국도 5,745개(23.1%), 지방도 4,355개(17.5%) 등의 순으로 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이 밖에 차량 총 중량 40tonf까지 운행할 수 있는 1등급(DB-24) 교량은 전체 교량 중 약 72%인 18,070개, 2등급(DB-18) 교량은 약 17%인 4,305개, 나머지 교량은 3등급 미만이다.



[표 2.1.2] 도로별 교량 현황

(단위: 개)

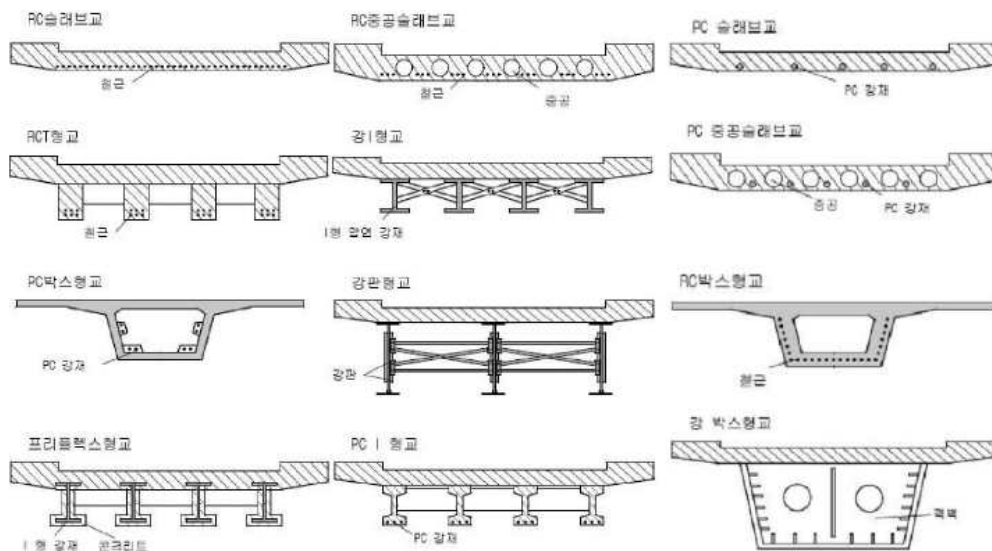
구분	합계	고속 국도	일반 국도	특별 시도	국가지원 지방도	지방도	시도	군도	구도
합계	24,923	6,882	5,745	1,162	986	3,369	2,603	3,795	381
DB-24 (1등급)	18,070	6,683	4,673	801	553	1,728	1,560	1,896	176
DB-18 (2등급)	4,305	176	791	260	273	1,139	585	973	108
DB-13.5 (3등급)	1,956	23	46	57	136	467	377	769	81
기타	592	0	235	44	24	35	81	157	16

[표 2.1.3] 설계하중별 전국의 교량분포 현황

일반적으로 교량을 상·하부 구조로 구분할 때, 변단면 PC-빔에 속하는 상부 구조 형식은 프리플렉스(PF), PSC I형교(PSCI), PSC 박스형교(PSCB), 그리고 강박스교(STB) 등이다.

명칭	형식	명칭	형식
AR	아치형교, Arch	RCH	RC중공슬라브교 Reinforced Concrete
CS	사장교(지주있는 교량) Cable Stayed	RCS	RC슬라브교 Reinforced Concrete
PF	Preflex형교	RCT	RC T형교 Reinforced Concrete T형
PSCB	PSC박스형교 Prestressed Concrete Box	SPG	강판형교 Steel Plate Girder
PSCH	PSC중공형교 Prestressed Concrete Hole	STB	강박스형교 Steel Box
PSCI	PSC I형교 Prestressed Concrete	STI	강 I형교 Steel
PSCS	PSC슬라브형 Prestressed Concrete	SU	현수교 Suspension Bridge
RA	라멘교(구조가 통으로 연결) Rahman	TR	트러스교 Truss
RCB	RC 박스교 Reinforced Concrete Box	ETC	기타

[표 2.1.4] 상부구조 구분



[표 2.1.5] 상부거더 형식

변단면 PC빔과 관련하여 국내 일반 PC빔 및 프리플렉스 빔을 포함한 중·장경간장 교량에 속하는 거더교에 대한 기술 현황은 다음과 같으며, 일반적으로 상부교량 형식별로 중·장경간 교량의 적용 가능한 지간장의 범위는 다음과 같다.

교량 형식	형식별 적용 지간 범위						비고
	20m	30m	40m	50m	60m	70m	
기존 PC빔							
Preflex빔							
강박스							
PSC Box							
변단면 PC빔							

[표 2.1.6] 중·장경간 교량의 형식별 적용가능 지간장

구분	PSC빔	프리플렉스빔	강박스거더교	PSC박스교
개요	빔 제작시 1회의 긴장력을 도입하여 초기 및 최종상태의 응력이 허용응력 범위를 만족하도록 하는 재래식 PSC빔 제작공법	강재 I-girder에 preflexion하중을 채하시킨 후 릴리즈하여 강재의 복원력으로 하부케이싱 콘크리트에 압축응력을 도입하는 일종의 프리텐션 공법	상하플랜지와 복부판들이 폐단면으로 용접결합되어 휨모멘트, 전단력, 비틀림모멘트에 저항토록 설계되는 공법	제작장에서 소정의 길이로 제작된 PSC Box Segment를 교량가설지점까지 이동시켜 segment를 접합, 연결시키면서 가설하는 공법
지간	20~35m	25~50m	40~70m	45~70m
장점 단점	- 일반적인 공법으로 제작 및 거치 등 시공성이 용이함 - 단면특징상 균열 안전성이 크며 공사비 저렴 - 지간이 짧고 형고가 높아 미관이 불리 - 30m이상 장지간 가설이 곤란하며 형하공간 확보가 어려움	- 낮은 형고로 형하공간 확보가 용이함 - Preflexion을 위한 많은 강재사용으로 경제성이 가장 불리 - I-girder의 현장용접이 과다하여 용접부 피로균열에 취약 - 콘크리트 빔보다 진동, 치짐이 커서 사용성 불리	- 공장 제작 후 현장 조립공정으로 선행에 대한 적용성 양호 - 변단면 곡선 제작시 미관상 유리 - 현장 도착 후 별도의 조립 및 가멘트의 가설공정이 필요함 - 정기적인 점검 및 도장 등 유지관리 불리 - 공사비 고가	- 박스형 다면 구성으로 강성이 커 활하중에 대한 안정성 양호 - 비틀림 저항성 양호 - 강교 대비 유지관리비 저렴 - 추후 보수보강 필요시 box 내부에 별도의 외부노출강선에 Pre stressing 필요 - 공사비 고가

[표 2.1.7] 중·장경간 교량의 형식별 특징

나. 국내 기술개발 현황

최근 국내의 중·장경간 교량에 대한 거더의 가장 큰 기술동향은 강재 가격의 상승에 따라 보다 경제적인 콘크리트 교량형식을 선호하면서 기존 강박스 또는 PSC 박스교량이 가지고 있던 지간장의 범위를 PC-빔 또는 프리플렉스 빔 계열의 거더로 대체하고자 하는 것이다.

특히, 다양한 형태의 저형고, 장경간 신기술 PC-빔 등이 개발되고 있으며, 또한, 고강도 콘크리트의 개발과 활발한 적용으로 인해 장경간 PC-빔의 개발에 탄력이 붙고 있는 실정이다. 아울러, 사회적 요구와 정책적 방향에 따라 교량의 건설에 있어서도 미관을 고려한 경관설계의 요구가 증대되고 있다.

대표업체	보유기술 및 내용
한국도로공사 (research.ex.co.kr)	고강도 콘크리트를 이용한 장경간 PSC빔 개발 (지간장 60m 개발중)
인터콘스텍 (www.interconstech.co.kr)	- IPC 거더의 설계 및 시공(신기술 453호), Seg 구조로 현장연결하는 분절형 PSC거더 - 강선의 연속배치 3경간 가능
우경건설 (www.wkcos.com)	- PSC-E Beam교, 장경간 PSC빔교 (경간장 L=50M) - PSC빔의 연속화공법(5경간 연속가능), 신기술 517호 - 경제적인 SRC단면 (강재+철근콘크리트) 구성에 의한 단면 강성 증대와 연속화 강재 + PS 긴장재에 의한 구조접합으로 완전연속 구조 구현
만세코리아 (www.mansecorea.com)	- UDPSC Beam교, 신기술 270호, 입다운에 의한 연속화 공법 - 단경간의 경우 상부와 고정단 교대의 일체화로 신축이음장치 필요 없음
ENE건설 (www.eneconst.co.kr)	WPC교, 넓은 상부 플랜지형태의 박스거더를 병렬 연결시켜 상부 슬래브 시공시 거푸집 및 동바리가 필요없는 공법
동양종합건설 (www.dycpf.co.kr)	CPSC-I Beam교, PSC빔의 연속화 공법
비엔지건설터트 (www.bng.co.kr)	PNP거더교, S-PC공법, 프리캐스트바닥판+PSC거더 (까치발 구간 포함)
장현산업 (www.jangheon.co.kr)	DR거더교, PSC거더+프리캐스트 가로보+프리캐스트 바닥판
삼표이엔씨 (www.sampyoenc.com)	SPC빔교 (Seg별 분리 제작후 조립, 무바닥판 공법)
휘선건설 (www.wheesun.com)	특수가설장비, ILM, MSS, FCM, 론칭거더(PSC Beam 및 거더를 론칭거더를 이용하여 MSS방식으로 가설)
신승이엔씨 (www.ss4588.com)	강가로보 공법, PSC Beam의 현장 타설 콘크리트가로보의 대체 공법

[표 2.1.8] PC-빔 및 개량형 PSC 빔 교량 대표 업체

◆ IPC Girder(Incrementally Prestressed Concrete Girder), 신기술 453호, 인터컨스텍

구 분	공 법 개 요																	
교량전경																		
공법개요	빔제작시 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로 긴장력을 도입하여 형고를 줄이거나 장지간 가설이 가능한 PSC 공법																	
지간별/형고	최대적용지간 : $L \leq 50m$ (바닥판 포함) <table><tr><th>Type</th><th>L=30m</th><th>L=35m</th><th>L=40m</th><th>L=45m</th><th>L=50m</th></tr><tr><td>일반형</td><td>1.4m</td><td>1.7m</td><td>2.0m</td><td>2.3m</td><td>2.6m</td></tr></table>						Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m	일반형	1.4m	1.7m	2.0m	2.3m	2.6m
Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m													
일반형	1.4m	1.7m	2.0m	2.3m	2.6m													
공법특성	제작장에서 1차긴장 준비			2차강선 삽입														
																		
장 단 점	▶ 기존의 PSC Beam과 달리 시공단계의 하중증가를 고려하여 단계적으로 긴장력을 수차례 도입할 수 있도록 설계, 제작 ▶ 철근강결 및 2차강선 연결 긴장방법으로 연속지점부를 연결																	
	▶ 2차인장으로 재래식 PSC Beam보다 낮은 형고 가설가능 ▶ 기존 PSC Beam과 유사한 공정으로 제작거치가 간단 ▶ 단계별 긴장으로 단면 효율성이 좋음 ▶ 거더에 내장된 비부착강선(정착구당 2가닥)을 이용한 유지보수가능 ▶ 기존 PSC빔 대비 거더고가 낮아 가설시 전도사고 위험이 낮음 ▶ 연속교의 경우 받침장치가 2개로 실질적인 연속거동에 불리 ▶ 전경간 일괄긴장(연속화 강선) Prestress 손실증가(연속효과미흡) (부모멘트 슬래브의 인장균열 우려 상존) ▶ 플랜지 폭이 넓어 PSC Beam보다 곡선교 적용성 불리																	

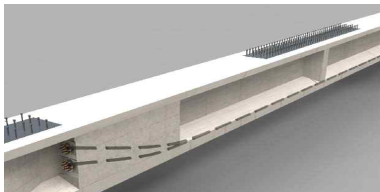
◆ UD-PSC Beam(UP-DOWN Prestressed Concrete Beam), 신기술 270호, 만세코리아

구 분	공 법 개 요					
교량전경						
공법개요	빔을 거치 연결 시킨 후 지점의 상승 및 하강과정을 통해 빔하부에는 2차 압축응력을 내측지점 바닥판 콘크리트에는 합성후 인장응력에 대응하는 압축 응력을 도입한 공법					
지간별/형고	최대적용지간 : $L \leq 45m$ (바닥판 포함)					
	Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m
	일반형	1.4m	1.7m	2.0m	2.2m	-
공법특성	제작장에서 빔제작			지점상승 및 하강		
						
	▶ 단순교인 경우 거더 중앙부를 상승시키고 바닥판 시공후 하강시켜 2차 압축력을 도입 ▶ 내측지점부 상승 및 하강을 통해 부모멘트구간 바닥판에 압축력 도입					
장 단 점	▶ 하부플랜지 콘크리트에 2차압축력 도입으로 크리프, 건조수축에 의한 압축력 손실 방지 ▶ 내측지점부 바닥판 콘크리트에 도입된 압축력으로 내하력 증가 ▶ 빔 상승 및 하강속도의 차이에 의한 비틀림력 발생가능(균열발생) ▶ 빔의 상승 및 하강 공정 추가로 시공이 복잡하고 품질관리 불리 ▶ 별도의 보수보강용 강연선이 없어 유지관리성 불리 ▶ 곡선교 적용성이 PSC Beam 계열중 가장 불리 ▶ 단경간일 경우 UP-DOWN을 위한 가벤트 설치로 공사비 증대					

◆ WPC Girder(Wide-Flange Prestressed Concrete Girder), 특허 645941호, 이엔이건설

구 분	공 법 개 요					
교량전경						
공법개요	상부플랜지 폭이 넓은 거더를 거의 맞닿도록 배치한 후 슬래브를 타설하여 중립축을 위쪽으로 이동시켜 상하부 플랜지 응력값의 효율성을 최적화 시킨 공법					
지간별/형고	최대적용지간 : L≤40m (바닥판 포함)					
	Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m
	일반형	1.5m	1.7m	2.0m	-	-
공법특성	강재 거푸집 제작			PC 강연선 설치		
						
	▶ 상부플랜지 폭이 넓은 박스형태의 거더교로 중립축이 위쪽으로 이동되어 거더 상·하 플랜지 응력 균형으로 단면의 효율성 증대					
장 단 점	▶ 사용하중 하에서 Full Prestressing으로 인장균열 미발생 ▶ 박스형태의 폐단면 구성으로 좌굴 및 비틀림 강성 우수 ▶ 낮은 형고로 형하공간 확보가 용이하고 성토고를 줄일 수 있음 ▶ 일반적인 PSC 빔과 유사한 제작공정으로 시공이 용이함 ▶ 슬래브 타설시 거푸집과 동바리 공정이 필요없어 시공성이 우수하고 별도의 하부 안전대책 불필요 ▶ 가설중량 증가에 따른 가설비용 증가 ▶ 연속지점부 슬래브 연속처리로 슬래브 인장균열 발생우려 ▶ 거더 콘크리트 타설시 내부거푸집(EPS 블록) 부력 발생우려					

◆ PSC e-Beam(Prestressed Concrete eccentric Beam), 신기술 517호, 우경건설(주)

구 분	공 법 개 요					
교량전경						
공법개요	상부플랜지에 강판을 합성시켜 PS긴장재의 편심효율성을 증대시킴으로 저형고, 장지간 가설이 용이하고 연속지점부를 강판+철근+PS긴장재로 일체화시킨 PSC 공법					
지간별/형고	최대적용지간 : L≤50m (바닥판 포함)					
	Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m
	일반형	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.5m
공법특성	PS 강연선의 편심효과 상승			연속지점부 완전 연속화		
						
장 단 점	▶ 상부플랜지에 강판 합성으로 인한 중립축 상승으로 편심거리 증대 ▶ 연속지점부 완전체결(강판+철근+PS긴장재)로 내구성 증대 ▶ 변지간 구성시 동일 형고 가능(형고적용성 증대)					
	▶ 다양한 형고적용으로 현장 적용성 및 경제성 우수 (PF수준의 저형고에서 강교수준의 장지간 가능) ▶ 강재와 철근, PS강연선에 의한 완전한 연속가능(1 Shoe) ▶ 다목적 정착블럭 설치로 사용용도에 따른 구조효율성 증대 (1차긴장, 2차긴장, 연속부긴장, 유지관리 정착구) ▶ 보수보강용 쉬스판 별도내장으로 유지관리성 수월성 증대 ▶ 기존 PSC빔 대비 거더고가 낮아 가설시 전도사고 위험이 낮음 ▶ 저형고 채택시 강재중량 증가로 공사비 다소 상승 ▶ 플랜지 폭이 넓어 PSC Beam보다 곡선교 적용성 불리 ▶ 연속부에 대한 시공이 다소 복잡(정밀시공 및 품질관리 필요)					

◆ DR Girder, 특허 72473호, 장현산업/한맥기술

구 분	공 법 개 요					
교량전경						
공법개요	PSC 빔단면과 반단면 프리캐스트 바닥판을 이용하여 비합성 상태에서 긴장력을 도입하여 강선의 도입효율을 높이고, 연속화 강선의 편심량을 극대화하여 구조적 효율성 및 경제성을 추구한 공법					
지간별/형고	최대적용지간 : L≤45m (바닥판 포함)					
	Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m
	일반형	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	-
공법특성	빔제작			Precast 부재사용		
						
	▶ 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로(1,2차) 긴장력을 도입 ▶ 제작장 1차 긴장 후 슬래브 비합성 상태에서 2차긴장 ▶ 전경간 연속배치된 2차강선이 연속부강선 역할을 겸용 ▶ 내하력 저하시 2차 PS강선으로 추가긴장					
장 단 점	▶ 2차강선의 전경간 연속으로 PS 유효율 감소 ▶ 반단면 Precast Slab+조립식가로보+현장타설 혼용 ▶ Precast 바닥판과 거더합성불량(들뜸)으로 Slab 균열 우려 ▶ 2차 긴장재 삽입시공이 어려움(전경간 일괄 삽입) ▶ 비부착강선삽입/긴장시 피복파괴로 재긴장 역할상실 ▶ 비부착강선의 Relaxation으로 재긴장 효율저하 ▶ Precast 바닥판 적용으로 공사비 상승					

◆ PnP Girder, 신기술 542호, 비엔지컨설파트

구 분	공 법 개 요					
교량전경						
공법개요	다단계 긴장을 하는 “PSC 거더”에 있어 연속강선으로 사용되는 2차 정착구가 거더단부 상단에 있고, 외부강선에 의한 유지관리와 반단면 Precast 슬래브공법을 적용한 공법					
지간별/형고	최대적용지간 : L≤50m (바닥판 포함)					
	Type	L=30m	L=35m	L=40m	L=45m	L=50m
	일반형	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.5m
공법특성	빔 제작			Precast 바닥판		
						
	▶ 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로(1,2차) 긴장력을 도입 ▶ 반단면 Precast 바닥판 거치후 비합성 상태에서 연속화 2차긴장 ▶ 내하력 저하시 격벽부에 설치된 Hole에 외부강선을 도입하여 유지관리					
장 단 점	▶ 2차강선의 전경간 연속으로 PS 유효율 감소 ▶ 반단면 Precast Slab+현장타설 혼용 ▶ Precast 바닥판과 거더합성불량(들뜸)으로 Slab 균열 우려 ▶ 2차 긴장재 삽입시공이 어려움(전경간 일괄 삽입) ▶ 격벽부에 설치된 외부강선의 내하력 증가효과 저하 ▶ 외측빔 외부강선 도입시 편심으로 빔 뒤틀림 현상우려 ▶ Precast 바닥판 적용으로 공사비 상승					

2. 국외 산업동향 및 기술개발 현황

가. 국외 산업동향

외국의 경우에도 PC-빔의 활용범위가 보다 넓으며, 일정한 지간 이하의 표준 PC-빔의 경우에는 제조업과 같이 공장제작으로 경제성, 시공성 등을 최우선으로 적용하고 있다.

또한, 다양한 단면 형상의 PC-빔의 설계와 시공, 그리고 고강도 콘크리트를 이용한 장경간 PC-빔의 시공이 일반화되어 있는 실정이다. 특히, 미국의 경우에는 PC-빔 단면에 변화를 주어 Bulb Tee 형태의 PC-빔이 개발되어 경간장 50 ~ 60m 지간의 PC-빔이 실용화되어 폭 넓게 시공되고 있다.

나. 국외 기술개발 현황

국 외 현 황	대 상 기 술	비 고
NEBT 거더 (New England BulbTee)	PC-빔 단면 합리화	국내도입 실용화
100MPa 이상 실용화	고강도 콘크리트	실용화 초기단계

[국외 관련기술 현황]

3. 국내·외 기술개발 현황에서 차지하는 위치

가. 기술의 차별성

(1) 기술 개발 전략

- (가) 기존 연속화(연속교) 사례 분석을 통한 최적의 연속화 방안 기술개발
- (나) 변단면 PC-빔의 장경간화와 경제성 확보를 목표로 연속 구조계 기술개발
- (다) 관련 기술의 지속적 국내외 특허 확보로 시장 경쟁력 및 지배력 향상

(2) 핵심기술의 확보와 기술 비교 우위

(가) PC-빔 단면적의 가변화

- ① PC-빔의 단면에 변화를 주어 단면제원을 변수로 합리화 설계
- ② PC-빔 제작에 있어 빔 종방향으로 빔 하연을 곡선형상으로 유지할 수 있도록 빔의 중앙부는 낮고, 단부(지점부)는 높은 형태로 빔의 하연을 구현
- ③ PC-빔의 하부에 곡선형으로 변화를 줌으로써 미관을 향상시키고 타 공법 대비 최소의 경비로 **최상의 교량** 美를 실현

(나) 고강도 구현

- ① 최소의 강재와 고강도 콘크리트를 적절히 사용하여 구조성능을 향상
- ② 기존 PC빔보다 경간장을 40~50m까지 연장하는 기술 구현

(다) 전용 거푸집 및 제작대의 제작

- ① 전용 제작대 및 거푸집의 최적화 기술 개발
- ② 제작대 및 거푸집의 경제적 사용회수 적정화
- ③ 공사비의 최소화로 경제성 구현

(라) 긴장절차 간소화 및 긴장력 극대화

긴장을 1회에 허용수준까지 도입함으로써 상기의 불필요한 절차의 간소화로 시공성 향상 및 공사비 절감으로 경제성을 극대화 함.

(3) 연속화 방안 기술의 상용화

(가) 연속지점부 부모멘트 제어를 위한 최적의 연속화 방안 기술 개발

(나) 기존 PC-빔에 있어서 교좌장치 2개 설치에 따른 비효율성 극복을 위하여 교좌장치 1개 설치를 통한 진정한 연속교 구성의 핵심기술 개발

나. 경제적 우위성

(1) 타 기술과의 비교

구 분	PC-빔	프리플렉스	강박스	PC박스
m당 공사비	658만원	1,229만원	1,565만원	1,243만원

(2) 일반 PC-빔 및 개량형 PC-빔과의 공사비 비교

본 연구개발 과제인 변단면 PC-빔은 도로교의 경우 경간장 30~35M 범위에서는 일반 PC-빔 그리고 그 이상 40 ~ 50m 범위 에서는 강박스 거더나 PC-박스 거더, 프리플렉스 그리고 최근 개발된 각종 신공법 거더와 경쟁이 예상된다.

또한, 콘크리트를 주요 재료로 하는 경제적 장점으로 강재를 주요 재료로 하는 여타 거더 와는 개략 40 ~ 50%의 경제성으로 충분한 가격 경쟁력을 가지고 있다.

그리고, 본 기술은 시공을 단순화 한 원가절감으로 2~3차 다단계 긴장구조를 가지는 여타 공법 대비 충분한 가격 경쟁력으로 시장 점유가 가능할 것으로 판단된다.

구 분		연장	공사비	비율(%)
변단면 PC-빔		30m	2,520만원	100.0
		40m	4,000만원	100.0
일반 PC-빔		30m	2,450만원	97.2
다단계긴장형 PC-빔	IPC 거더	30m	2,850만원	113.1
		40m	4,460만원	111.5
	E - Beam	30m	3,200만원	127.0
		40m	4,900만원	122.5

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대한 이론적 연구

가. PSC 빔 교량의 연속화 방안 현황

(1) 역사적 배경

1886년 미국의 공학자 P. H. Jackson이 프리스트레스트 콘크리트 개념을 처음으로 제안하였고, 1927년 프랑스의 Fressynet이 고강도 긴장재를 소개함으로써 콘크리트의 프리스트레싱이 실질적으로 의미를 갖게 되었으며, 1941년 프랑스 Luzancy의 마네강에 아치형의 2절점 포탈 프레임 교량이 최초의 프리스트레스트 콘크리트 교량으로 건설되었다.

그 이후로 1951년 미국 펜실베이니아의 필라델피아에 Walnut Lane Memorial 교가 건설되면서 프리스트레스트 콘크리트 교량이 본격적으로 건설되기 시작했다.

최초의 본격적인 프리스트레스트 콘크리트 교량으로 알려져 있는 이 Walnut Lane Memorial 교는 현장타설로 건설된 후긴장 프리스트레스트 콘크리트 교량으로서 3경간 연속교(22.6m-48.8m-22.6m)였다. 그러나, 이 후에 건설된 많은 프리스트레스트 콘크리트 교량은 프리캐스트 콘크리트 주형을 사용한 형교였는데, 이는 품질 관리가 용이하고, 시공성 및 경제성이 우수하다는데 이유가 있었다. 프리캐스트 주형을 사용한 만큼 교량의 구조 형식은 단순지지였으며, 1960대 초반까지 25m 경간장 이하의 소형 교량에 널리 사용되었다.

그러나, 이 기간 동안 건설된 교량들 중 3경간 내지 4경간의 단순지지 교량으로 건설된 고속도로 횡단육교의 경우에는 갓길 쪽 교각이 고속도로 주행 차량의 안전성을 떨어

뜨린다는 것을 알게 되었고, 이에 따라 1967년 AASHITO의 Traffic Safety Committee의 보고서에서 권고한 바와 같이 갓길 쪽 교각이 없는 2경간 횡단육교가 요구되게 되었다.

이를 위해서는 경간장의 증가가 필요하였고 프리캐스트 주형을 사용한 형교의 경우에는 연속화가 이를 가능케 하는 방법이었다.

초기에는 이와 같이 주행 차량의 안전성 향상이라는 이유에 의해 PSC 빔 교량의 연속화가 요구되었다. 그러나, 이 후부터 현재에 이르기까지는 이러한 이유보다도 신축이음 개소의 감소에 따른 유리관리비용의 절감 및 주행 차량의 승차감 향상, 장대화를 통한 교각개수 감소에 따른 건설비용 절감, 누수로 인한 주형 단부와 하부구조의 손상 방지 등, 프리캐스트 주형의 연속화 시공이 일반적으로 시행되어 왔다. 현재에는 3경간 내지 4경간 이상의 PSC 교량의 경우 연속화가 적용되지 않는 경우가 거의 없다.

국내에서 최초로 건설된 PSC 빔 교량은 1969년 단순지지 20m 단경간으로 경부고속도로 상에 건설된 오계 1교이며, 그 이후로 현재까지 가장 많이 건설된 콘크리트 교량 형식의 하나가 되었다. 초창기의 PSC 빔 교량은 오계 1교와 마찬가지로 단순지지 교량으로 건설되었으나, 1980년대 초반부터 연속교의 잇점을 고려하여 연속화 공법이 도입되기 시작하여 현재에는 단경간이 아니면 모두 연속화가 적용되고 있다.

현재 국내에서 적용되고 있는 PSC 빔 교량의 연속화는 프리캐스트 주형을 단순지지 상태로 놔두고 바닥판만 연속화 시키는 방법이다. 이 방법은 연속화를 통해 얻을 수 있는 모든 장점을 얻지는 못하지만, 공기가 짧고 시공이 간편하다는 이유에 의해 국내 뿐 아니라 미국 등지의 외국에서도 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 그러나 주형까지 완전히 연속화 시킴으로써 연속교의 잇점을 모두 얻고자 하는 관심은 현재에도 계속 증가

되고 있는 추세이며, 이에 따라 바닥판 연속화 공법만을 사용하고 있는 국내와는 달리 미국의 경우에는 주형을 완전히 연속화 시키는 공법도 많이 사용되고 있으며 이의 사용은 더욱 증가되고 있는 추세이다.

(2) PSC 빔 교량의 연속화에 따른 장·단점

PSC 빔(Prestressed precast concrete girder) 교량은 주형이 프리캐스트 콘크리트 부재이므로 분할주형(spliced girder)과 같은 방법을 사용하지 않는 한 주형이 기본적으로 단순지지 상태로 교각에 거치된다. 따라서, 연속화 공법은 통상 주형 자중을 제외한 나머지 하중에 대해 연속교 거동을 하게 하는 공법이라고 할 수 있게 되는데, 이렇게 연속교 거동을 하게 함으로써 얻어지는 장점과 단점을 가지고 있다.

현재 국내에서 사용하고 있는 연속화 방법과 같이 완전한 연속화를 통해 얻어지는 모든 잇점이 얻어지지 않는 연속화도 있지만, 여기서는 완전한 연속화에서 얻어지는 장, 단점을 뜻하게 된다.

(가) 장 점

- ① 신축이음장치의 수를 줄임으로써 주행성을 개선할 수 있으며, 신축이음장치의 유지관리에 소요되는 노력과 비용을 절감할 수 있다.
- ② 단순교는 하나의 교각 상면에 두 개의 받침을 놓아야 하는 반면 연속교는 한 개의 받침으로 상부구조가 지지될 수 있으므로 교각의 단면이 더 작아질 수 있으므로 하부구조물(교각)의 공사비를 절감할 수 있다.
- ③ 단순교에 비하여 경간장을 증가시킬 수 있기 때문에 교각의 수를 줄일 수 있고, 이로 인하여 교량의 건설비용을 절감할 수 있다.

- ④ 단순교에 비하여 형고를 감소시킬 수 있기 때문에 상부구조의 중량을 감소시킬 수 있으며, 따라서 교각에 작용하는 하중을 감소시킬 수 있다. 그리고 상부구조의 중량감소로 인하여 설계 지진력을 감소시킬 수 있다.
- ⑤ 단순교에 비하여 연속교는 부정정 차수(redundancy)가 크기 때문에 붕괴에 대한 안전율이 증가한다.
- ⑥ 형고나 경간장이 같은 경우에 단순교에 비하여 처짐이 작게 발생한다.
- ⑦ 지진이나 풍하중에 대한 저항력이 증가한다.
- ⑧ 단순교에 비하여 형고가 작고 경간장이 길기 때문에 미관이 우수하다.

(나) 단 점

- ① 크리프, 건조수축, 온도 등에 의한 영향을 크게 받으며, 이에 대하여 구조해석 및 설계시 충분한 검토가 이루어져야 한다. 그리고, 단순교와는 달리 지반 침하가 구조물에 심각한 문제를 유발할 수 있기 때문에 심한 부등침하가 예상되는 지역에서는 이에 대한 대책이 마련되어야 한다.
- ② 연속교에서는 최대 모멘트와 최대 전단력이 동일한 단면(부모멘트부)에서 발생하기 때문에 휨 전단파괴에 대한 검토가 필요하며, 극한강도가 감소될 수 있다.
- ③ 연속교에서는 지점부에 부모멘트가 발생되며, 적절한 대책을 세우지 않으면 지점부 바닥판에 균열이 발생할 수 있다. 상판에 발생한 균열을 통하여 우수나 염화물이 침투되어 철근을 부식시키거나 콘크리트 재료의 열화를 발생시킬 수 있다.
- ④ 설계가 복잡하며 크리프, 건조수축 등에 의한 영향이 검토 되어야 한다.
- ⑤ 반곡점이 많으면 마찰 손실이 크다.
- ⑥ 연속교는 일반적으로 경간장이 길어서 프리스트레싱에 의한 축방향 변위가 커서 하

부 수직부재 하단의 수평반력이 크게 나타난다.

⑦ 설계에서 2차응력을 고려해야 한다.

⑧ 최대 휨모멘트와 최대 전단력이 동일 단면에서 나타난다.

⑨ 휨모멘트가 교번됨으로써 정하중에 대한 동하중 비가 큰 경우 프리스트레스트 콘크리트 부재를 경제적으로 설계할 수 없는 경우가 발생한다.

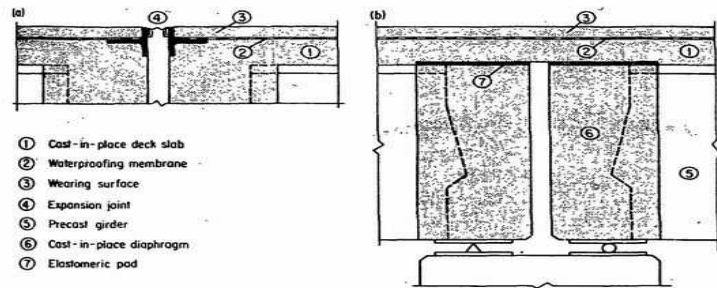
(다) PSC 빔 교량의 연속화 방법

(1) 단순지지 주형에의 연속 바닥판 설치 공법

[그림 3.1.1]은 단순교의 두 경간 사이에 장치된 신축이음과 이의 제거를 주목적으로 하여 바닥판을 연속으로 설치한 PC-빔 교량의 예를 보이고 있다. 교량에 설치되는 신축이음은 주행 차량의 승차감을 떨어뜨릴 뿐 아니라, 차륜에 의한 손상에 취약하여 잦은 보수공사를 요구하며, 이에 따른 교체에 의한 공사비 및 교통 차단 등의 경제적 손실을 유발하게 된다. 더욱이 신축이음을 견고하게 잘 설치하지 않으면 신축이음주변의 콘크리트까지 손상되기도 한다. 또한, 신축이음을 통한 누수는 주형 단부 및 교량받침을 손상시키는 요인이 될 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법으로 [그림 3.1.1](b)와 같은 연속화 방법이 사용될 수 있다. 즉, 주형의 단순지지 체계는 그대로 유지하고 단지 바닥판을 연속화함으로써 신축이음을 제거하는 방법이다. 이 그림에는 표시되어 있지 않지만 연속 바닥판 내에는 연속 철근이 배치되는 것이 일반적이다. 이 방법이 주행차량의 승차감을 향상시키며 신축이음 제거에 따른 유지관리비 절감 효과를 주는 것은 명백하다. 그러나, 누수 문제는 확실하게 해결하지 못하는 것으로 알려져 있다. 우선 연결부 위치의 바닥판에는 횡균열이 필연적으로 발생하며 그 균열을 통한 누수가 가능하다는 것이다. [그림 3.1.1](b)는 바닥판 내에 방수막까지 내장시킨 예이지만 바닥판의 변형으로 인해 이 방수막이 손상되

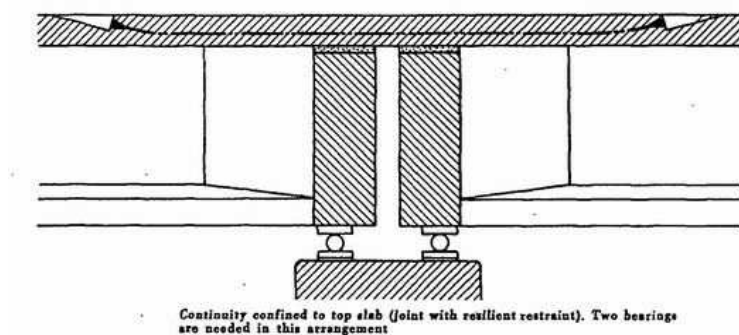
기 때문에 완전한 방수가 이루어지지 않는 것으로 알려져 있다. 바닥판에서의 횡 균열은 반복적인 차륜과의 접촉으로 인해 바닥판 표면을 손상시키고 결과적으로는 바닥판 자체를 손상시키는 원인으로 작용하는 것으로 알려져 있다.



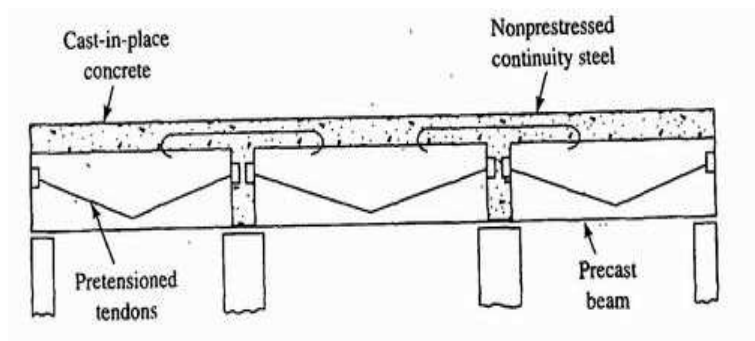
[그림 3.1.1] 단순교의 신축이음과 연속 바닥판에 의한 PC-빔 교량의 연속화

이 연속화 방법은 이 점 외에도 교량 자체가 연속교로 거동하지 않으므로 연속교에서 얻을 수 있는 제반 잇점을 거의 얻을 수 없다. 그러나, 주행차량의 승차감 향상과 신축이음 제거를 통한 유지관리비 감소의 장점만으로도 타당성이 인정되는 경향이 있고, 또 무엇보다도 다른 연속화 방법들에 비해 시공이 간편하다는 점이 높이 평가되어 국내를 비롯하여 전 세계적으로 현재 가장 많이 사용되고 있다.

[그림 3.1.2]와 같이 긴장재를 사용하여 바닥판에 압축을 도입하는 방법도 사용되고 있다. 이 방법은 바닥판에서의 횡균열 발생을 억제함으로써 누수 및 바닥판 손상을 막을 수 있지만, 완전한 연속교가 이루어지지 않으므로 경제성 등 연속교의 제반 잇점을 살리지 못하는 것은 마찬가지이다. 또한, 바닥판에 프리스트레스를 가하므로 바닥판의 강도가 커야 할 필요가 있을 수 있다.



[그림 3.1.2] 바닥판을 긴장재로 긴장하는 연속화 하는 방법



[그림 3.1.3] 연속바닥판 시공을 통한 PC-빔 교량의 연속화 방법

[그림 3.1.3]은 [그림 3.1.1]이나 [그림 3.1.2]와 달리 주형과 주형 사이에 연결 콘크리트를 채움으로써 연결부에서의 바닥판 거동을 좀 더 안정화 시키고자 하는 방법이다.

과거에는 이러한 연결콘크리트 하단부에 주형과 주형을 연결할 목적으로 coupling 철근을 배치하기도 했으나, 크리프 및 건조수축의 장기변형과 반복적인 활하중의 작용으로 인해 결과적으로는 연결콘크리트에 균열이 발생함으로써 하단 철근이 별 의미가 없는 것으로 알려짐에 따라 현재에는 통상 무근 콘크리트가 사용되고 있다. 이에 따라 전체적인 거동면에서는 연결 콘크리트를 채운 것과 채우지 않은 것 사이에 별반 차이가 없다. 다만, 바닥판에 발생하는 횡 균열의 분포 양상에 다소의 차이를 주기는 한다.

(2) 전체 연속 긴장재를 사용한 완전 연속화 공법

(1)항에서 설명한 연속화 방법은 교량 자체의 거동을 연속교로 만드는 것 보다는 신축이음을 제거하는 데에만 관심을 갖는 연속화 방법이라 할 수 있다.

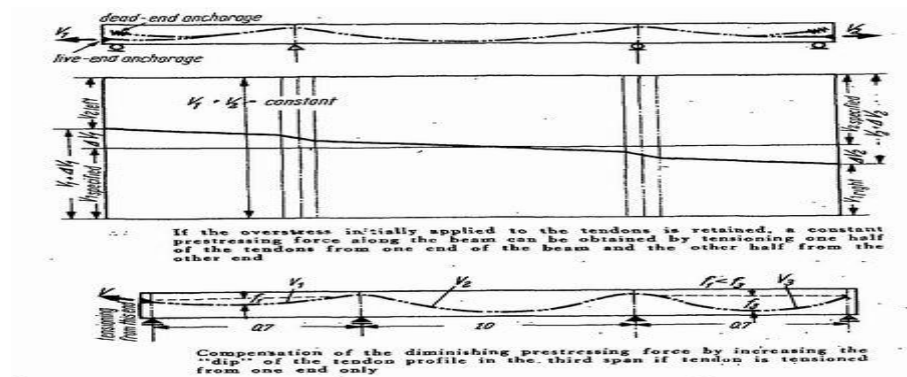
이 방법은 긴장재를 사용하면 바닥판에 압축력을 도입함으로써 횡균열이 발생하지 않게 한다 하더라도 실질적으로 연속교가 아니므로 연속교에서 얻을 수 있는 잇점이 얻어지지 않는 방법이다.

PC-빔 교량의 연속화에 대한 최초 동기는 경간장을 길게 해야 한다는 필요에 의한 것이었다. 이에 따라 주형을 완전히 연속화시키는 공법들이 다수 제안되어 왔다. 이 공법들은 주형 자체가 완전히 연속화 됨으로써 교량이 전체적으로 연속교로 거동하게 하는 공법들이다.

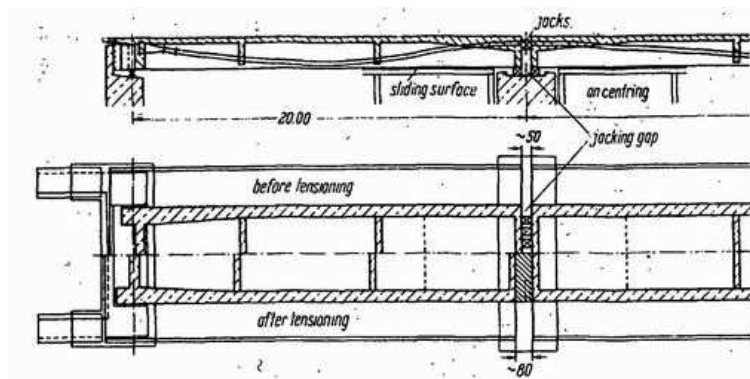
① 전체 연속교에 대한 연속 긴장재 공법

[그림 3.1.4]는 전체 연속 경간에 걸쳐 연속 긴장재를 사용하여 배치하는 방법을 보이고 있다. 이 방법은 긴장재를 긴장이 가능한 형상이 되도록 concordant cable을 조정하는 개념으로 긴장재를 배치함으로써 지속하중 작용상태에서의 휨모멘트가 전체적으로 거의 0(ZERO)이 되게 하는 방법이다. 따라서, 장기 처짐이 최소화 되게 할 수 있고 긴장력이 집중 배치되는 구간이 없으므로 전반적인 거동적 효율성이 높다는 장점을 갖는다.

그러나, 긴장단으로부터 dead 단까지에 곡률 변화가 많아서 긴장 효율이 떨어진다는 단점을 갖는다. [그림 3.1.4]는 이러한 단점을 보완하는 방법으로 양쪽 단에서 전체 긴장력의 절반씩 긴장하는 방법과 dead 단쪽 경간의 긴장재 형상에 dip을 많이 주는 방법을 보이고 있으나, 이 방법도 4경간 내지 5경간 이상이 되면 실효성이 없는 것으로 알려져 있다. 또한, 두 개 이상의 연속교를 인접시켜 시공하기가 어렵다는 단점도 있다.



[그림 3.1.4] 전체 연속 경간에 걸친 연속 긴장재를 사용한 연속화 공법



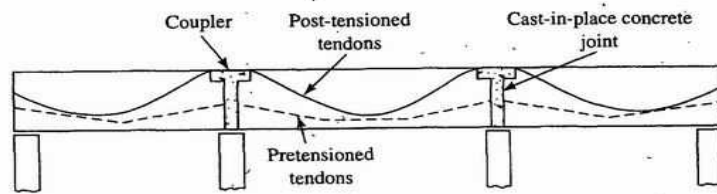
[그림 3.1.5] 긴장력 추가를 위한 jacking gap 방법

[그림 3.1.5]는 이런 경우 부족한 긴장력을 추가하는 방법의 하나인 jacking gap 방법을 보이고 있다. 이는 주 긴장재를 긴장하기 전에 주형 사이에 간격을 두어 유압잭을 설치해 두었다가 주 긴장재를 긴장하고 난 후 유압잭으로 간격을 넓혀 긴장재에 긴장력을 추가한 후 간격 안에 콘크리트를 채워 넣고 유압잭을 제거하는 방법이다. 좋은 방법이지만 유압잭을 긴장재의 중심선에 정확히 맞추어 설치해야 하는 등 공정이 복잡하다.

그리고, 특히 PC-빔 교량의 경우에는 유압잭을 설치할 만한 공간이 통상 충분치 않아 별로 사용되지는 않는다. 또한, 유압잭이 제거된 후 유압잭이 설치되었던 공간에 채워 넣 어지는 콘크리트에는 이후 하중에 의한 부모멘트가 가해질 때 국부적으로 인장응력이 발생하는 단점도 있다.

② Coupler를 사용한 연속 긴장재 긴장 공법

[그림 3.1.6]은 전체 연속 경간에 걸쳐 연속 긴장재를 형성시킨다는 점에서는 [그림 3.1.4]의 방법과 마찬가지로이지만, 긴장재를 각 연결부에서 긴장하고 coupler로 연결하여 정착시킨다는 점에서 다르다. 또한, 긴장력이 겹쳐지는 등의 역학적 불리성은 없으나, 연결부에서의 긴장을 위한 공간이 필요하고 Coupler로 양쪽 긴장재를 연결해야 하는 시공상의 복잡성이 있으며 Coupler로 정착이 완료된 후 타설되는 콘크리트에는 이 후 재하되는 하중에 의해 인장응력이 발생할 수 있다.

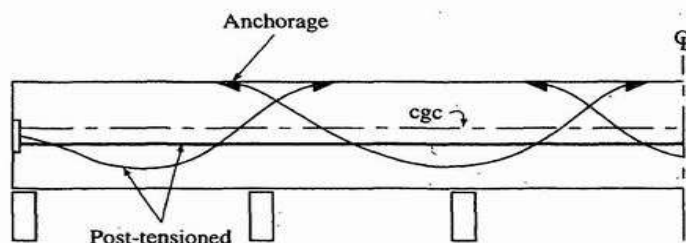


[그림 3.1.6] Coupler를 사용한 연속 긴장재 긴장 공법

③ 긴장재의 겹침 배치에 의한 연속화

[그림 3.1.7]은 긴장재를 내부 지점부에서 엇갈리게 배치하여 겹쳐지게 하고 긴장하는 방법을 보이고 있다. 이 방법은 내부지점에서 긴장재가 겹쳐짐으로써 겹침 구간에서의 긴장력이 다른 구간의 두 배가 된다는 점이 [그림 3.1.4 및 3.1.6]의 방법과 다른 점이다.

그런데 이 방법은 본래 프리캐스트 주형을 연속화하는 방법으로 개발된 것이 아니고 교량전체를 현장타설로 일체로 건설할 때에 적용하는 방법으로 개발되었다.



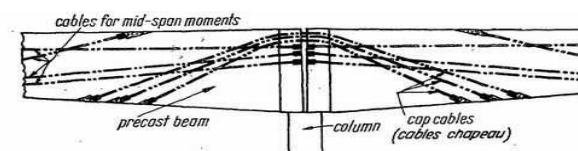
[그림 3.1.7] 긴장재의 겹침 배치에 의한 연속화

④ 연결 긴장재를 사용한 완전 연속화 공법

㉠항에서는 연속경간 전체에 걸쳐 연속 긴장재를 긴장하는 방법으로 연속화를 이루는 방법을 소개하였다. 이 방법들은 연속화용 긴장재들이 경간 전체 및 연속 경간 전체에 배치됨으로써 긴장력이 전반적으로 분포되는 특징을 가지며, 어떤 일정 구간 안에 긴장력이 집중되지 않는다는 특징을 갖는다. 이러한 방법들과는 달리 연속화용 긴장재들이 연결부에만 개별적으로 배치되는 연속화 방법들이 있다.

㉡ Cap cable을 사용한 연속화

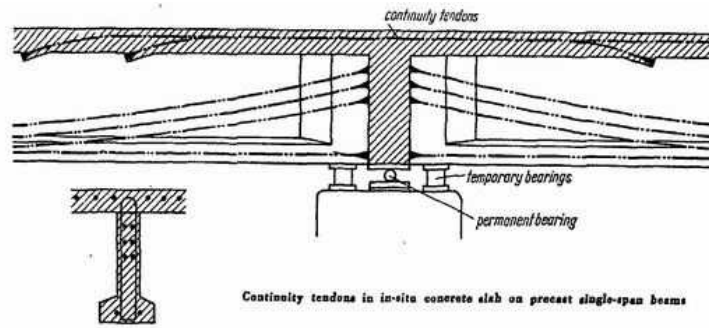
[그림 3.1.8]은 프랑스에서 개발된 연속화 공법이다. 주형의 하면에 긴장단을 설치하여 연결 긴장재를 배치함으로써 연결부에 정모멘트를 제공하는 것을 특징으로 한다. 연결부에서의 정모멘트 유발을 통한 부모멘트 상쇄 효과는 잘 발휘되지만, 긴장력에 의한 상향력이 주형 내부의 응력 분포를 복잡하게 만드는 등의 문제가 있어 좋은 연속화 방법은 아닌 것으로 알려져 있다.



[그림 3.1.8] Cap cable을 사용한 연속화

㉢ 연결 콘크리트로 주형을 연결하고 연결긴장재로 바닥판을 긴장하는 방법

[그림 3.1.9]는 긴장재로 바닥판을 긴장한다는 점에서는 [그림 3.1.2]와 방법과 동일하지만 주형과 주형 사이를 연결 콘크리트 또는 격벽으로 채움으로써 추가 고정하중 및 활하중에 대해 연속교 저항 거동이 이루어지게 한 방법이다. 바닥판에도 압축력이 도입됨과 동시에 바닥판 타설 이후의 하중에 대해서는 연속교 거동도 한다는 점에서 바람직한 방법으로 평가된다.

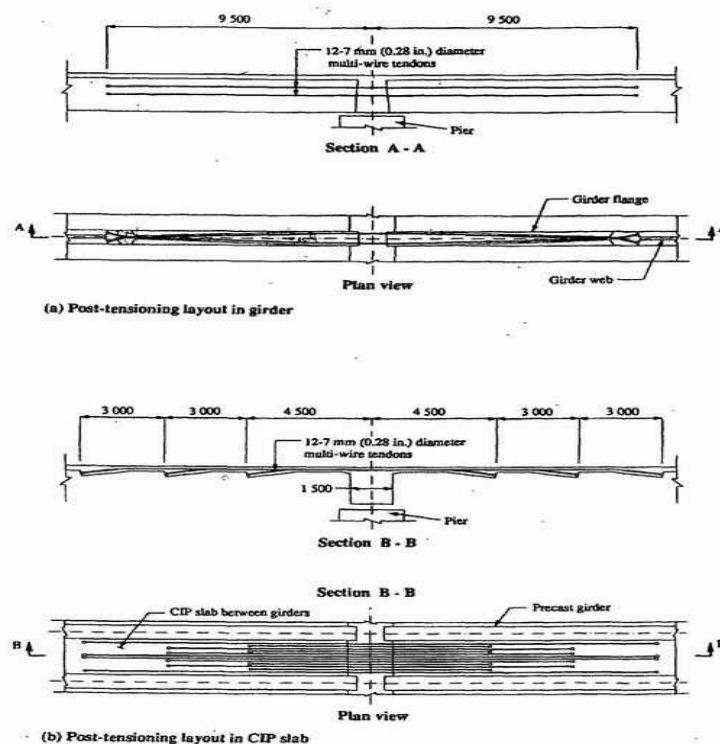


[그림 3.1.9] 연결 콘크리트로 주형을 연결하고 연결긴장재로 바닥판을 긴장하는 방법

㉔ 연결긴장재로 주형과 바닥판을 모두 긴장하는 방법.

[그림 3.1.10]은 일본에서 전형적으로 사용하고 있는 연속화 방법이다.

[그림 3.1.9]와 마찬가지로 연결 긴장재로 바닥판을 긴장하는 것 외에 직선 긴장재를 사용하여 주형 자체도 연속화 시킨다. 주형을 연속화 한 후에 바닥판을 타설하므로 바닥판 중량도 연속교 거동으로 저항하여 경제성 효율이 [그림 3.1.9]의 방법보다 좋다.



[그림 3.1.10] 일본의 PSC 빔 교량 연속화 방법

나. 변단면 PC-빔의 연속화 방안

(1) 변단면 PC-빔의 연속화 공법의 특징

(가) 일반적인 PC-빔의 연속화는 빔과 빔은 구조적으로 분리되면서 차량 주행성 향상을 위하여 바닥판 슬래브만 철근을 이용하여 연속화시키는 활하중 연속화 개념으로 시공되고 있다.

(나) 반면, 근년에 개발된 다단계 긴장형 PC-빔 (e-빔, IPC-거더 등)은 바닥판 슬래브 뿐만 아니라 빔과 빔을 강선연결하여 연속화 시키고 있는데, 이때 연속화 강선은 지점부 뿐만 아니라 빔 전체를 관통시켜 긴장함으로서 빔 중앙부에도 불필요한 긴장력이 도입되어 비 경제적인 연속화 시공이 이루어지고 있다.

(다) 이에 반하여 변단면 PC-빔 연속화는 지점부 바닥판 슬래브를 연속화 시키는 것은 물론, 연속지점부 부모멘트의 합리적인 제어를 위하여 빔과 빔을 철근으로 강결시키면서 연속 지점부 인근을 강선 연결하여 긴장시켜 보다 합리적으로 경제적인 연속화 시공이 가능한 특징이 있다.

(라) 또한, 변단면 PC-빔은 유사 PC-빔과 달리 지점부 형고가 높은 단면 특성상 연속지점부 단면 강성이 높아 연속화에 매우 유리한 구조적 장점이 있다.

(2) 철근 강결에 의한 연속화 방안

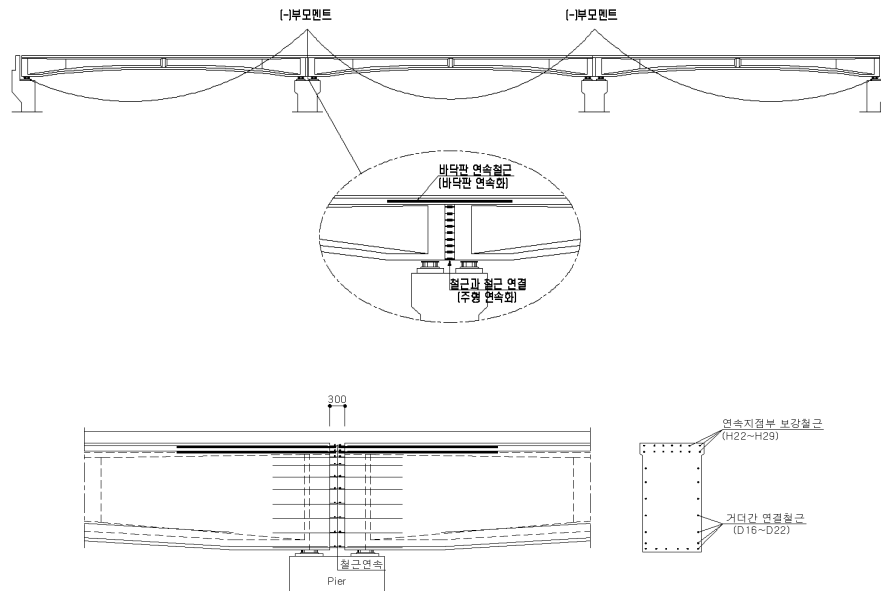
(가) 개요

변단면 PC-빔은 중앙부 대비 단부 형고가 높아 연속지점부 단면 강성이 커 연속교에 있어서 지점부에 발생하는 부모멘트를 저항하는데 유리한 구조로서, 슬래브만 연속화 시키는 기존 PC-빔과 달리 연속지점부 빔과 빔 이를 철근으로 강결시켜 연속화 시킴으로서 슬래브 하중을 포함한 추가 고정하중, 활하중에 의하여 발생하는 연속지점부 부모멘트에 대한 휨 저항 성능이 유리한 구조적 특징이 있다.

● 연속지점부 빔과 빔 사이 철근을 이용한 강결 구조
⇒ 주형 연속화

+

● 바닥판 연속구조
⇒ 바닥판 연속화



[그림 3.1.11] 철근 강결에 의한 변단면 PC-빔 연속화 방법

(나) 구조 검토 내용

변단면 PC-빔 연속지점부는 합성 전 슬래브 하중과 합성 후 작용하는 하중에 대하여 각각 설계강도가 소요강도 이상을 가질 수 있는 강도설계법에 의해 단면검토를 수행한다.

① 합성전 연속지점부 단면 검토

(단위 : KN-m)

구 분	슬래브 하중 (Md)	소요강도 1.3xMd (KN-m)	설계강도 (KN-m)	강도검토 $\phi M_n \geq M_u$	필요 철근량 (mm ²)	사용 철근량 (mm ²)	비 고
45m 연속교	- 4,189	- 5,446	6,268	O.K	6,584	8,994 (2단-H29-7EA)	부(-)

② 합성후 연속지점부 단면 검토

- 단면력

(단위 : KN-m)

구 분	합 성 후 고정하중	활 하 중	2차 단면력		지 점 침 하	합 계	비 고
			건조수축	크리프			
45m 연속교	- 1,378	- 2,978	- 826	- 900	- 193	- 6,275	부(-)

- 연속지점부 단면 및 균열 검토

(단위 : KN-m)

구 분	합성후 하중 (Md)	소요강도 (KN-m)	설계강도 (KN-m)	강도검토 $\phi M_n \geq M_u$	필요 철근량 (mm ²)	사용 철근량 (mm ²)	비 고
45m연속교	- 6,275	- 8,194	11,981	O.K	8,955	15,484 (2단-H22@125)	부(-)

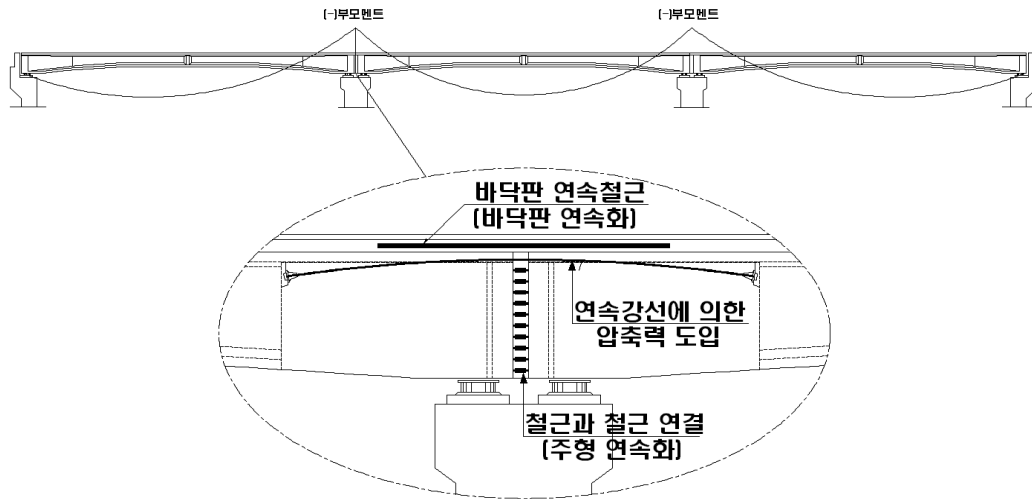
구 분	균열폭 (mm)	허용 균열폭 (mm)	균열검토 $w > w_a$
45m연속교	0.171	0.595	O.K

(3) 강선연결 및 긴장에 의한 연속화 방안

(가) 개요

변단면 PC-빔 연속화는 지점부 바닥판 슬래브를 연속화 시키는 것은 물론, 빔과 빔을 철근으로 강결시키면서 연속 지점부 인근을 강선 연결하여 긴장시켜 소정의 압축력을 도입시켜 빔과 바닥판이 합성된 후에 작용하는 추가 고정하중과 활하중에 의해 발생하는 연속지점부 부모멘트의 합리적인 제어를 하고 있다.

타 공법과 달리 연속지점부의 부분 강선에 의한 긴장력 도입을 통해 효과적으로 발생하는 부모멘트를 감소시켜 바닥판 철근이 부담하는 인장력을 최소화 함으로써 철근량의 감소를 유도할 수 있어 구조적 안전성을 확보함과 동시에 경제적인 효과를 얻을 수 있다.



[그림 3.1.12] 강선연결 및 긴장에 의한 변단면 PC-빔 연속화 방법

(나) 구조 검토 내용

변단면 PC-빔 연속지점부는 합성 전 고정하중은 슬래브 연속화 이전에 기저항 하였고, 합성 후 작용하는 추가 고정하중 및 활하중에 대하여 각각 설계강도가 소요강도 이상을 가질 수 있는 강도설계법에 의해 단면검토를 수행한다.

① 합성전 연속지점부 단면 검토

- 합성후 고정하중에 의한 단면력(M_2) : - 1,378 KN-m
 - 연속강선에 긴장에 의한 단면력(M_{P2}) : 1,313 KN-m
- $\therefore M_2 + M_{P2} = -1,378 + 1,313 = 64 \text{ KN-m}$

② 합성후 연속지점부 단면 검토

- 단면력

(단위 : KN-m)

구 분	합 성 후 고정하중	활 하 중	2차 단면력		지 점 침 하	합 계	비 고
			건조수축	크리프			
45m 연속교	- 64	- 2,978	- 826	- 42	-193	- 4,103	부(-)

- 연속지점부 단면 및 균열 검토

(단위 : KN-m)

구 분	합성후 하중 (Md)	소요강도 (KN-m)	설계강도 (KN-m)	강도검토 $\phi M_n \geq M_u$	필요 철근량 (mm ²)	사용 철근량 (mm ²)	비 고
45m연속교	- 4,103	- 6,487	8,843	O.K	7,106	11,460 (2단-H19@125)	부(-)

구 분	균열폭 (mm)	허용 균열폭 (mm)	균열검토 $w > w_a$
45m연속교	0.150	0.602	O.K

다. 변단면 PC-빔 연속교 축소모델

변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구를 바탕으로 적용되는 경간장별 단면(형고)과 단면형태, 긴장력의 크기, 쉬스판의 적절한 배치 등을 도출하였으며, 이에 따른 구조해석을 실시하여 이론적인 구조적 안정성을 확보하였다. 이에 실 교량 재하실험에 앞서 변단면 PC-빔의 연속화 방법에 대해 시공순서별로 시뮬레이션 할 수 있도록 시작품을 제작하였다. 시작품의 제원은 현재 가장 많이 적용되고 있는 경간장 L=40m(H=1.8m)의 실물을 1:10로 축소 모형화 하였다.



[그림 3.1.13] 변단면 PC-빔 L=2@40m=80m 연속교 축소형 모델 시작품

라. 변단면 PC-빔의 아칭효과 검증

(1) 연구개요 및 목적

변단면 부재로 구성된 보의 해석에 대해서는 1950년대 이후 많은 연구가 있었다. 초기의 연구로는 Arsham Amirikian[1]의 'Wedge-Beam Framing'을 들 수 있고, 유한요소해석기법의 발달에 따라서 유한요소해석에 적합하고 보다 정확한 응답을 구하기 위한 연구가 진행되었다.

변단면 PC-빔의 경우,, 미관이 수려한 장점이 있지만, 경간 중앙부의 단면 2차모멘트가 작아지기 때문에 보의 강성에 대한 우려를 일으킬 수 있다. 그러나 거더 거치시 일반적으로 탄성받침이 적용되며 수평저항력이 발생하게 된다. 탄성받침에 의한 수평 저항력은 하부플랜지에 압축응력을 발생시킨다. 그러므로 휨 응력에 의해서 발생하는 하부플랜지의 인장응력은 압축력에 의해서 상쇄되는 구조적으로 매우 효율적인 신형식 보가 될 수 있다. 또한 이러한 하부플랜지의 아치 효과는 균등단면 보 보다 경간장을 증대시킬 수 있으며, 미관이 수려한 보가 될 수 있다. 변단면 PC-빔의 아치효과를 검증하기 위해, 다음과 같은 세 가지 연구내용이 수행되었다.

첫째, 여러 가지 변단비에 대한 3차원 변단면 PC-빔과 다양한 균등단면 PC-빔이 모델링되었다. 변단면 PSC빔의 경우에는 빔의 길이 및 단부 높이를 각각 40m 및 2.2m로 고정시키고, 경간 중앙부의 단면높이를 1.3m부터 0.2m씩 증가시켜서 2.1m까지 총 5가지 PSC빔들이 모델링 되었다. 균등단면의 경우에는 빔의 길이를 40m로 고정시키고, 단면높이가 1.7m, 1.95m, 2.1m 등 3가지 경우에 대해서 모델링되었다.

둘째, 수치모델의 유효성을 검증하기위하여, 경간 중앙부 단면높이가 1.7m이고 길이가 40m인 변단면 PSC빔에 대한 정재하 실험결과가 이용되었다. 단면높이와 빔의 길이가 동일한 수치모델이 동일한 구조응답을 보이도록 실제 적용된 손실후 긴장력을 추정하였으며, 수치모델에 적용하였다. 마지막으로, 탄성받침의 사용으로 인한 아치효과로써 하현플랜지의 응력감소율이 정량화되었다.

(2) 구조모델링 및 구조해석

① 모델링 개요

변단면 보의 아치효과를 검증하기 위하여 [표 3.1.1]과 같이 총 16개의 3차원 유한요소 모델이 고려되었다. 우선 유한요소 수치모델은 변단면 PSC보와 균등단면 PSC모델로 분류 하였다. 변단면 보의 경우에 단부에서의 보 높이는 2.2m로 일정하고, 보의 중앙경간에서 보 높이는 1.3m, 1.5m, 1.7m, 1.9m, 2.1m인 5종류가 모델링되었다. 이는 다양한 변단비의 변화에 따른 아치효과를 관찰하기 위함이다. 균등단면의 경우에는 보의 높이가 1.7m, 1.95m, 2.2m 인 3종류가 모델링되었다. 이는 균등단면 보 대비 변단면 보의 성능 비교를 위함이다. 각각의 수치모델에 대하여 롤러지지와 탄성받침지지의 경계조건이 고려 되었다. 롤러지지 모델은 정재하실험의 지점조건이 롤러지지였기 때문에 수치모델의 유효성 검증을 위해서 고려되었다. 반면, 탄성받침 모델은 실제 현장에서는 탄성받침이 적용되고 있기 때문에 현장여건에서 아치효과 발현을 검증하기 위하여 고려되었다.

PSC No.	지점조건	중앙단면 높이 hc (m)	노드 수	유한요소 수	비고
1	로러지지	1.30	4,452	17,573	변단면
2	탄성받침				
3	로러지지	1.50	4,745	18,927	
4	탄성받침				
5	로러지지	1.70	4,622	18,067	
6	탄성받침				
7	로러지지	1.90	5,299	21,177	
8	탄성받침				
9	로러지지	2.10	5,663	22,758	
10	탄성받침				
11	로러지지	1.70	2,568	10,069	균등단면
12	탄성받침				
13	로러지지	1.95	2,796	10,943	
14	탄성받침				
15	로러지지	2.20	2,847	11,240	
16	탄성받침				

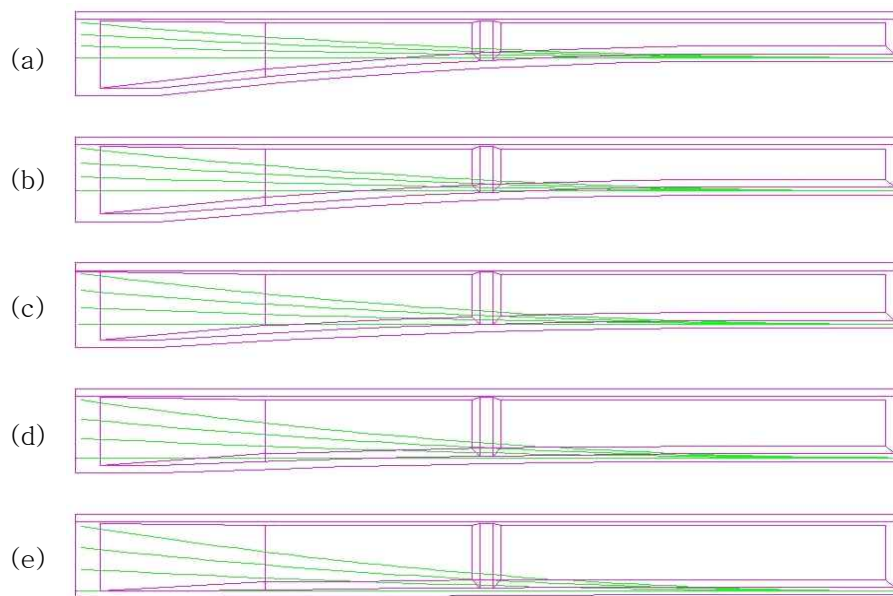
[표 3.1.1] 유한요소 3차원 모델링 TYPE

② 구조 모델링

㉠ 변단면

변단면 수치모델의 반측면도는 [그림 3.1.14]과 같다. 모든 수치모델들의 정착단에서의 보 높이는 2.2m로 동일하고, 중앙단면에서의 보 높이만을 [표 3.1.1]과 같다. 중앙단면의 높이변화에 따라 텐던(tendon)의 위치변화를 고려하였다.

PSC No.5를 기준으로 보 높이의 변화율을 고려하여, 텐던의 위치 및 크기를 변화시켰다. 보의 경간 중앙부 하부플랜지면과 최하단에 설치되는 텐던사이의 간격은 0.1m로 설정하였으며, 모든 수치모델에 동일하게 적용하였다. 또한, 보의 정착단에서 상부플랜지면과 최상단에 설치된 텐던사이의 간격은 모든 수치모델에 0.28m로 일정하게 설정하였다.



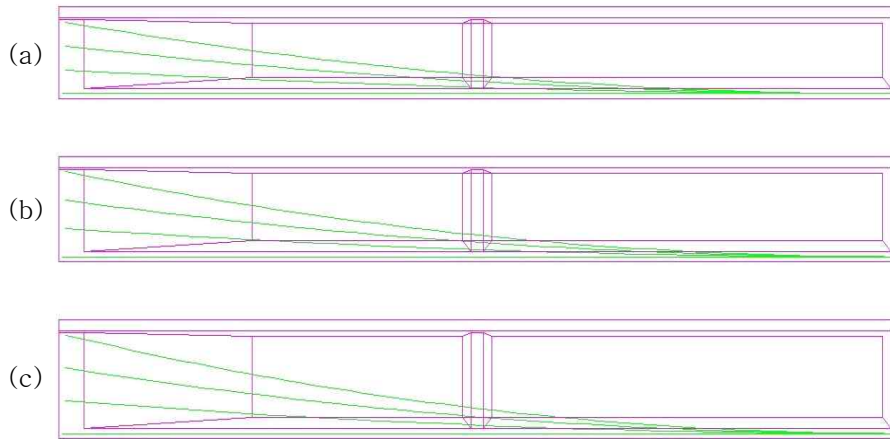
[그림 3.1.14] 변단면 수치모델의 텐던배치 반측면도

(a) $h_c=1.3\text{m}$, (b) $h_c=1.5\text{m}$, (c) $h_c=1.7\text{m}$, (d) $h_c=1.9\text{m}$, (e) $h_c=2.1\text{m}$

㉡ 균등단면

[표 3.1.1]과 같이 3개의 균등단면이 모델링되었다. 보 높이는 각각 1.7m, 1.95m, 2.2m이고 균등단면 보의 반측면도가 그림 3.2에 보인다. 보의 높이가 1.7m인 균등단면 PSC No.11의 텐던배치는 변단면 PSC No.5의 텐던배치와 동일하다. 반면, 보의 높이가 1.9m

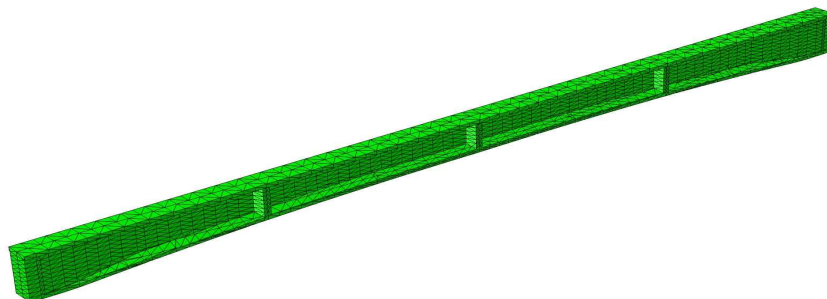
와 2.2m인 균등단면의 텐던배치는 변단면 보의 설정방법과 동일 방법으로 설정하였다.



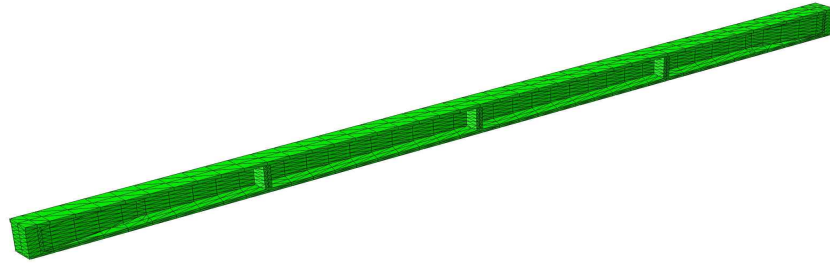
[그림 3.1.15] 균등단면 수치모델의 텐던배치 반측면도
(a) $h_c=1.7\text{m}$, (b) $h_c=1.95\text{m}$, (c) $h_c=2.2\text{m}$

㉔ 유한요소와 메쉬

변단면의 경우에 복부의 높이 및 두께가 종방향에 따라 변한다. 이를 고려하기 위하여 ABAQUS에서 제공하는 solid element C3D4를 사용하였다. 또한 텐던의 경우는 ABAQUS에서 제공하는 beam element B31을 사용하였다. [그림 3.1.16]와 [3.1.17]와 같이 변단면의 경우에는 종방향으로 0.5m씩 메쉬를 분할했으며, 균등단면의 경우에는 종방향으로 1.0m씩 메쉬를 분할하였다. 각 모델별 노드와 유한요소 개수는 [표 3.1.1]에 보인다.



[그림 3.1.16] 변단면 수치모델의 메쉬 : PSC No.5



[그림 3.1.17] 균등단면 수치모델의 메쉬 : PSC No.11

㉔ 재료 물성치

콘크리트의 경우 밀도는 $2.5 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$, 탄성계수 31,900 MPa, 프아송비 0.2를 사용하였다. 텐던의 경우에는 탄성계수 200,000 MPa, 프아송비 0.28이 사용되었다. 텐던의 열팽창계수는 $1.22 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 를 사용하였다. 프리스트레스거동을 구현하기 위하여 등가 온도하중을 재하 하였다. 텐던의 단면적은 1개당 $2,081 \text{ mm}^2$ 을 사용하였다. 이는 설계 시 사용되었던 중앙단면에서의 텐던 단면적이다.

㉕ 경계조건

단순보의 경계조건은 양 끝단으로부터 0.45m 되는 지점에 롤러와 힌지를 각각 적용하였다. 탄성받침으로 지지된 경우는 ABAQUS의 스프링 옵션을 사용하여 수평방향으로는 4,793 kN/mm, 수직방향으로는 1,008,500 kN/mm 스프링 계수를 적용하였다. 이는 KS탄성받침($G=1.15 \text{ MPa}$) 적용하중 1,750kN 치수 $300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ 에 대한 스프링 계수이다.

㉖ interaction

부착식 텐던을 모델링하기 위하여, ABAQUS에서 solid요소와 beam요소의 연동되었다. 프리스트레스 콘크리트의 경우에 solid 요소에 beam 요소가 함께 연동하는 구조이므로 ABAQUS에서 제안하는 embedded 옵션을 사용하였다. embedded 옵션은 solid 요소

에 beam 요소가 정착되어 있다는 가정 하에 모든 거동이 동일하게 진행되는 특징이 있으나 메쉬 분할시 solid요소와 beam요소 사이의 간격 tolerance를 정해주어야 하는 단점이 있다. 본 해석에서는 solid 요소와 beam 요소를 동일한 간격으로 메쉬를 나누어 이러한 단점을 피할 수 있었다.

㉔ 긴장력 모델링

텐던의 긴장력은 등방성이라는 가정 하에 온도변형률 관계식 (3.1)과 Hooke's law(3.2)를 사용하여 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \alpha(\Delta T) \quad \text{식(3.1)}$$

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{p_j}{A} \quad \text{식(3.2)}$$

$$\Delta T = \frac{p_j}{\alpha EA} \quad \text{식(3.3)}$$

여기서, ε 은 텐던의 변형률, α 는 텐던의 열팽창계수, ΔT 는 온도변화, σ 는 텐던에 작용하는 응력, E 는 텐던의 탄성계수, p_j 는 각 텐던 단면에 연직으로 작용하는 긴장력을 나타낸다. 식(3.3)을 이용하여 각 텐던에서의 온도변화는 [표 3.1.2]와 같다.

텐던 번호 j	긴장력 p_j (N)	열팽창계수 α ($1/^\circ\text{C}$)	탄성계수 E (MPa)	단면적 A (mm ²)	ΔT
1	2251000	1.22e-5	200000	2080.5	443.422727
2	2182000	1.22e-5	200000	2080.5	429.8304711
3	2257000	1.22e-5	200000	2080.5	444.6046623
4	2411000	1.22e-5	200000	2080.5	474.9410017

[표 3.1.2] 각 텐던에서의 온도변화

ABAQUS에서 온도변화 값을 이용하여 긴장력을 도입하기 위해서는 재료모델 단계에서 텐던 열팽창계수 값을 expansion 옵션에 적용시키고 하중적용 단계에서 각 텐던에 작용하는 온도변화를 적용시킨다.

㉠ 단계별 적용하중

[표 3.1.1]에 보이는 각각의 수치모델에 대하여, ABAQUS의 선형 탄성해석이 다음 4단계로 수행되었다.

첫째, 자중에 의한 구조해석이 수행되었다. 콘크리트의 단위중량은 $2,500 \text{ kgf/m}^3$ 이나 ABAQUS에서는 density 옵션과 gravity 옵션을 이용하여 단위중량이 산정된다. 그러므로 ABAQUS의 Dload옵션과 gravity옵션을 사용하여 $-10,000\text{mm/s}^2$ 의 가속도를 적용하였으며, 모든 영역에서 동등하게 적용하였다.

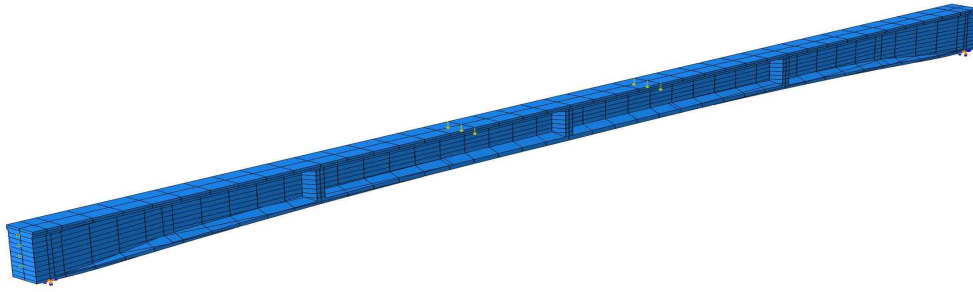
둘째, 텐던에 긴장력 도입에 따른 구조해석이 수행되었다. 텐던 4개에 등가 온도변화하중을 적용하였으며, 긴장후 손실을 -45%에 대하여 적용된 긴장력은 [표 3.1.2]와 같다.

텐던 번호	손실후 긴장력(kN)
1	1,238.5
2	1,200.1
3	1,241.4
4	1,326.1

[표 3.1.3] 손실후 긴장력

셋째, 등가설계하중 재하에 따른 구조해석이 수행되었다. [그림 3.1.18]과 같이 하중은 모델의 중앙을 기준으로 양쪽의 종방향으로 4.0m 상연플랜지에 집중하중이 적용되었다. 등가 설계하중의 크기는 중앙에서 횡방향으로 4.0m 지점에 461.685kN, 중앙에서 롤러방향으로 4.0m 지점에 460.635kN이 작용되었다. 또한, 하중 재하 중에 텐던의 긴장력 영향을 고려하기 위하여 텐던의 긴장력 도입 후 발생하는 콘크리트 응력(내력)을 initial conditions, type=stress 옵션에 외력으로 적용시켰다.

넷째, 최대하중 재하에 따른 구조해석이 수행되었다. 정재하실험에서 적용한 최대하중을 재하 하였다. 등가설계하중과 동일한 위치에서 789.460kN, 886.620kN을 각각 적용시켰으며 그 외 환경변수들은 모두 동일하다.



[그림 3.1.18] 변단면 수치모델의 설계하중 재하 : PSC No.5

(3) 구조해석 결과

① 처짐

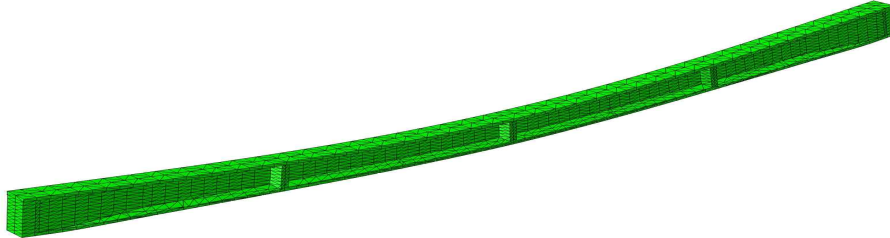
변단면 PSC No.5($h_c=1.7\text{m}$)와 균등단면 PSC No.11($h_c=1.7\text{m}$)의 하중단계별 변위형상이 각각 [그림 3.1.19]~[그림 3.1.22] 및 [그림 3.1.23]~[그림 3.1.26]에 보인다.

정재하실험시 수직변위계의 위치 (경간 $L/4$, $L/2$, $3L/4$)에서 롤러지지 및 탄성받침지지에 대한 변단면 보의 수직변위 및 수평변위가 [표 3.1.4]와 [표 3.1.5]에 요약되었다. 여기서, 변위 값은 각 하중단계별 누계변위가 아니고 상대적인 변위이다. 예를 들어, [표 3.1.4]에서 수치모델 PSC No.5의 중앙부 수직변위는 자중 및 긴장력도입으로 인해서 각각 -59.84mm , 48.87mm 의 처짐이 발생하였다. 이는 자중에 의해서 보의 중앙단면 하현플랜지가 59.84mm 의 하향 처짐이 발생하고, 추가적인 긴장력도입으로 인해서 48.87mm 만큼 다시 상향처짐이 발생한다. 그러므로 긴장력 도입후에 최종 누계 처짐은 $-59.84\text{mm} + 48.87\text{mm} = -10.97\text{mm}$ 이다. 그러므로 중앙단면 하현플랜지의 최종 처짐은 10.97mm 하향이 발생한다.

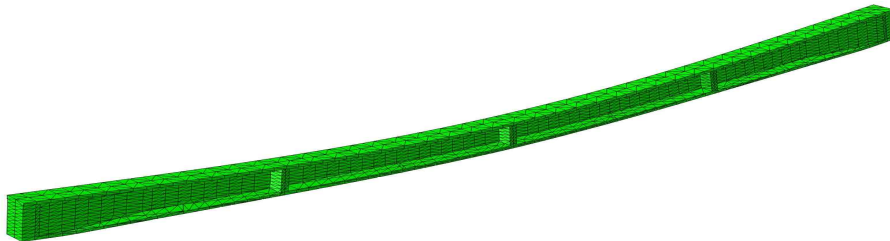
수평변위는 정재하실험시 수평변위계 부착위치에서 산정된 상대변위이다. 수평변위계가 보의 인장측에 부착되어 있기 때문에 수평변위의 양부호는 종방으로 보가 늘어난 길이를 의미한다. 반대로 긴장력도입시 보는 상향으로 솟음이 발생하는데, 이런 경우에

는 계측위치에서 보는 종방향으로 줄어들기 때문에 음부호를 가지고 있다.

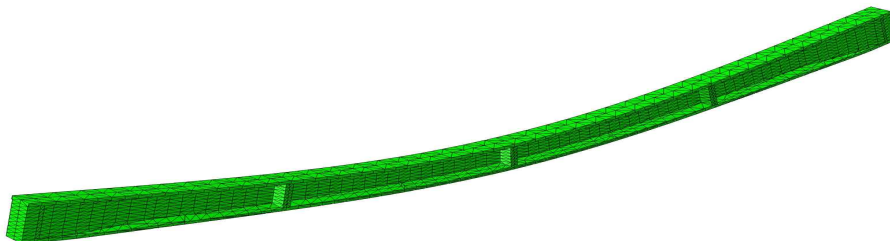
[표 3.1.6] 및 [표 3.1.7]은 균등단면 수치모델들의 각 하중단계별 변위를 요약한 것으로써, 부호규약은 상기 언급된 변단면 수치모델들의 그것과 동일하다.



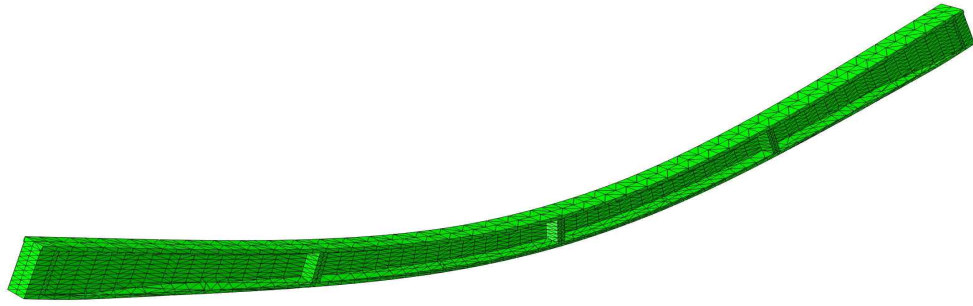
[그림 3.1.19] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7\text{m}$)의 자중에 의한 변위형상



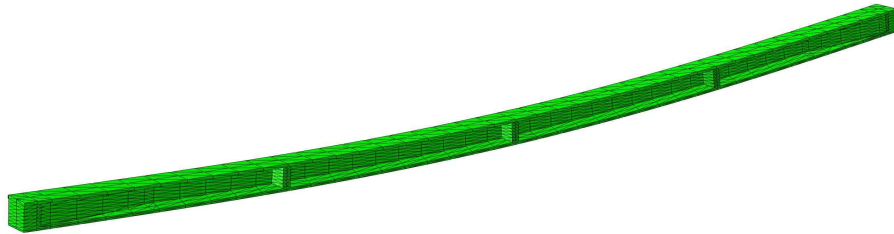
[그림 3.1.20] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7\text{m}$)의 긴장력도입시 변위형상



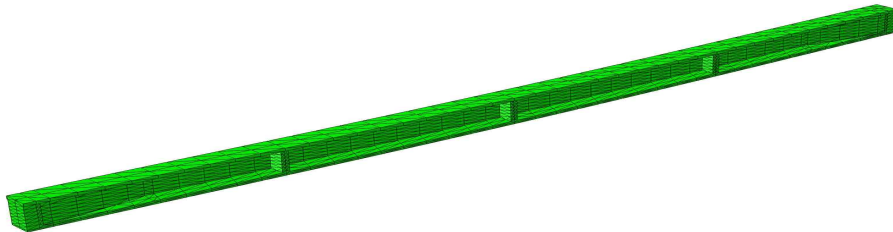
[그림 3.1.21] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7\text{m}$)의 설계하중 재하시 변위형상



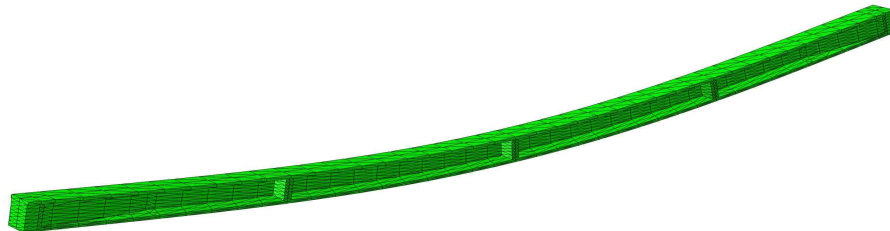
[그림3.1.22] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7\text{m}$)의 최대하중 재하시 변위형상



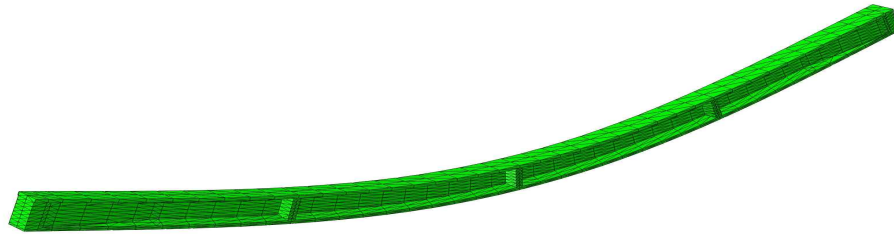
[그림3.1.23] 균등단면 PSC No.11 ($h_c=1.7\text{m}$)의 자중에 의한 변위형상



[그림3.1.24] 균등단면 PSC No.11 ($h_c=1.7\text{m}$)의 긴장력 도입시 변위형상



[그림3.1.25] 균등단면 PSC No.11 ($h_c=1.7\text{m}$)의 설계하중 재하시 변위형상



[그림3.1.26] 균등단면 PSC No.11 (hc=1.7m)의 최대하중 재하시 변위형상

모델	하 중	경간 L/4 수직(DT1)	경간 L/2 수직(DT2)	경간 3L/4 수직(DT3)	수평(DT4)
PSC No.1 (hc=1.3m)	거더 자중	-66.13	-98.35	-66.06	22.17
	긴장력 도입	41.53	63.63	41.48	-19.96
	설계하중	-133.41	-199.40	-133.29	37.15
	최대하중	-220.72	-332.44	-221.70	65.31
PSC No.3 (hc=1.5m)	거더 자중	-51.45	-75.78	-51.48	16.26
	긴장력 도입	36.32	54.62	36.34	-17.30
	설계하중	-94.20	-139.82	-94.25	23.04
	최대하중	-157.33	-235.27	-158.32	42.26
PSC No.5 (hc=1.7m)	거더 자중	-41.09	-59.84	-41.09	12.33
	긴장력 도입	33.27	48.87	33.27	-15.89
	설계하중	-68.79	-101.52	-68.78	14.14
	최대하중	-117.15	-173.91	-117.84	28.08
PSC No.7 (hc=1.9m)	거더 자중	-34.10	-49.36	-34.11	9.52
	긴장력 도입	29.57	42.97	29.58	-13.95
	설계하중	-51.95	-76.47	-51.95	8.39
	최대하중	-89.40	-132.29	-89.98	18.40
PSC No.9 (hc=2.1m)	거더 자중	-28.73	-41.25	-28.73	7.51
	긴장력 도입	27.15	38.83	27.15	-12.81
	설계하중	-39.75	-58.44	-39.75	4.40
	최대하중	-69.74	-102.84	-70.19	11.86

[표 3.1.4] 롤러지지 변단면 PSC보의 변위(mm)

모델	하 중	경간 L/4 수직(DT1)	경간 L/2 수직(DT2)	경간 3L/4 수직(DT3)	수평(DT4)
PSC No.2 (hc=1.3m)	거더 자중	-57.99	-86.60	-58.02	18.94
	긴장력 도입	34.14	52.92	34.09	-17.03
	설계하중	-119.98	-180.11	-119.95	31.98
	최대하중	-197.60	-299.25	-198.75	56.40
PSC No.4 (hc=1.5m)	거더 자중	-47.17	-69.70	-47.29	14.54
	긴장력 도입	31.75	48.09	31.77	-15.48
	설계하중	-88.76	-132.13	-88.89	20.88
	최대하중	-147.19	-220.93	-148.32	38.24
PSC No.5 (hc=1.7m)	거더 자중	-38.66	-56.46	-38.75	11.30
	긴장력 도입	30.13	44.48	30.13	-14.60
	설계하중	-66.78	-98.74	-66.84	13.29
	최대하중	-112.59	-167.61	-113.43	26.16
PSC No.8 (hc=1.9m)	거더 자중	-32.74	-47.49	-32.84	8.92
	긴장력 도입	27.55	40.17	27.56	-13.10
	설계하중	-51.37	-75.70	-51.46	8.12
	최대하중	-87.50	-129.70	-88.21	17.55
PSC No.10 (hc=2.1m)	거더 자중	-27.92	-40.18	-28.02	7.13
	긴장력 도입	25.75	36.92	25.75	-12.18
	설계하중	-39.82	-58.55	-39.89	4.41
	최대하중	-69.06	-101.97	-69.66	11.51

[표 3.1.5] 탄성받침 변단면 PSC보의 변위(mm)

모델	하 중	경간 L/4 수직(DT1)	경간 L/2 수직(DT2)	경간 3L/4 수직(DT3)	수평(DT4)
PSC No.11 (hc=1.7m)	거더 자중	-45.27	-64.82	-45.28	-8.88
	긴장력 도입	38.97	55.35	38.98	14.28
	설계하중	-73.58	-107.89	-73.59	-7.17
	최대하중	-126.81	-186.44	-127.64	-16.94
PSC No.13 (hc=1.95m)	거더 자중	-34.71	-49.69	-34.71	-7.78
	긴장력 도입	32.01	45.50	32.02	13.31
	설계하중	-50.73	-74.49	-50.74	-4.84
	최대하중	-92.46	-136.55	-93.08	-14.12
PSC No.15 (hc=2.2m)	거더 자중	-26.90	-38.58	-26.90	-6.89
	긴장력 도입	27.51	39.34	27.52	12.72
	설계하중	-35.17	-51.64	-35.16	-3.29
	최대하중	-66.04	-97.62	-66.49	-11.34

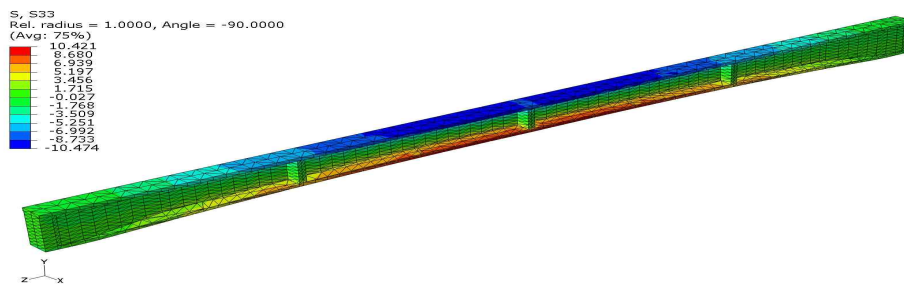
[표 3.1.6] 롤러지지 균등단면 PSC보의 변위(mm)

모델	하 중	경간 L/4 수직(DT1)	경간 L/2 수직(DT2)	경간 3L/4 수직(DT3)	수평(DT4)
PSC No.12 (hc=1.7m)	거더 자중	-43.97	-63.08	-44.06	-8.40
	긴장력 도입	36.88	52.51	36.89	13.53
	설계하중	-73.30	-107.53	-73.39	-7.03
	최대하중	-125.24	-184.37	-126.22	-16.31
PSC No.14 (hc=1.95m)	거더 자중	-31.93	-45.66	-32.03	-6.72
	긴장력 도입	28.57	40.54	28.57	12.00
	설계하중	-50.78	-74.57	-50.86	-4.83
	최대하중	-87.73	-129.27	-88.47	-12.44
PSC No.16 (hc=2.2m)	거더 자중	-25.35	-36.25	-25.46	-6.25
	긴장력 도입	25.35	36.13	25.35	11.82
	설계하중	-35.38	-51.96	-35.46	-3.37
	최대하중	-62.66	-92.35	-63.24	-10.00

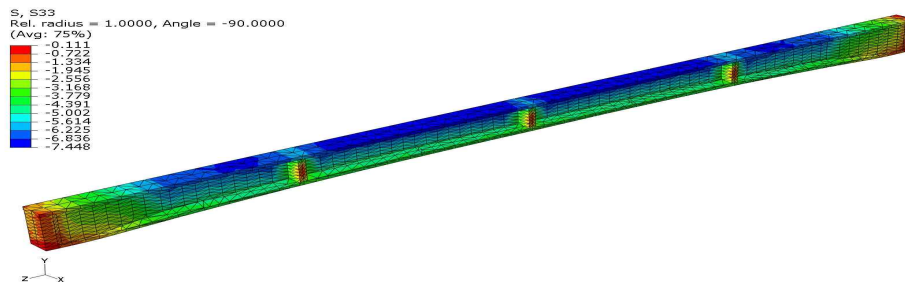
[표 3.1.7] 탄성받침 균등단면 PSC보의 변위(mm)

② 중앙단면 플랜지 응력

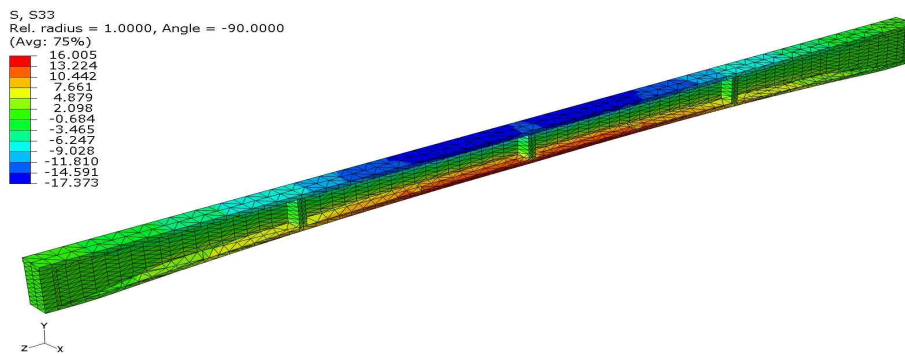
변단면 PSC No.5(hc=1.7m)와 균등단면 PSC No.11(hc=1.7m)의 하중단계별 발생 응력 분포가 각각 [그림 3.1.27]~[그림 3.1.30] 및 [그림 3.1.31]~[그림 3.1.34]에 보인다. 보의 경간 중앙에서 상현 플랜지 및 하현 플랜지에서 발생하는 수직응력들이 [표 3.1.8]와 [표 3.1.11]에 요약되었다. 여기서, 양의 값은 인장응력을 나타낸다.



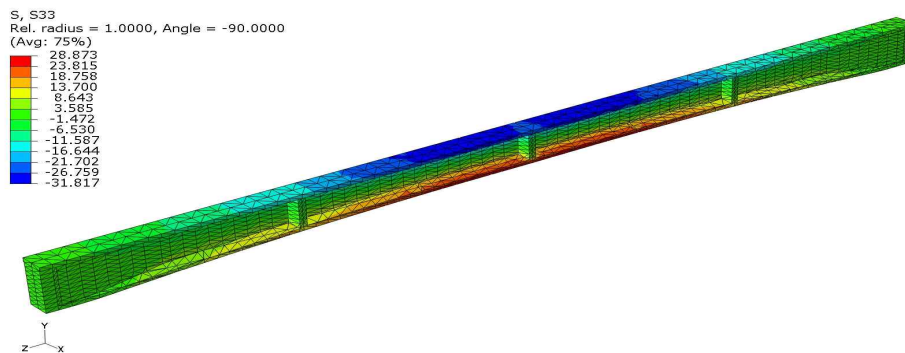
[그림3.1.27] 변단면 PSC No.5 (hc=1.7m)의 자중에 의한 응력분포



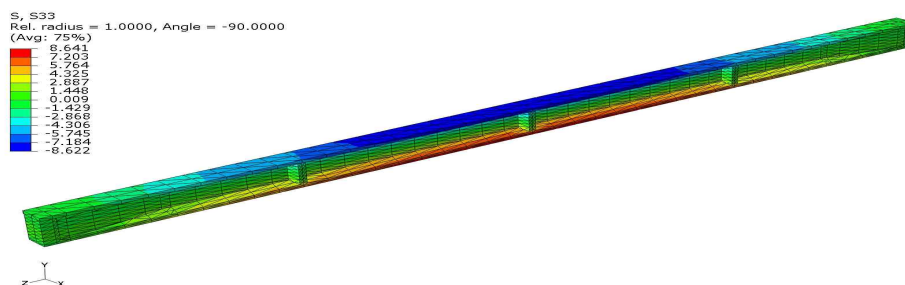
[그림3.1.28] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7m$)의 긴장력도입시 응력분포



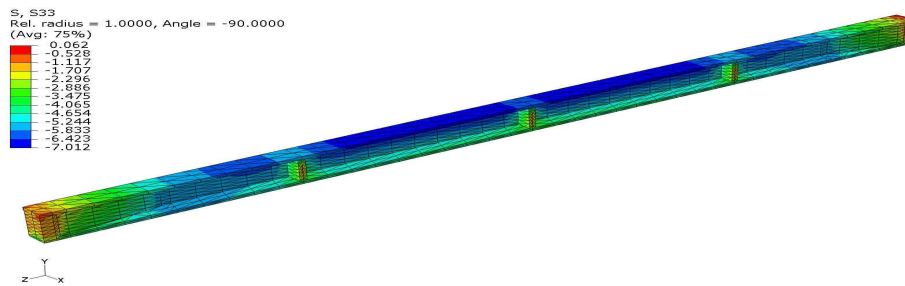
[그림3.1.29] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7m$)의 설계하중 재하시 응력분포



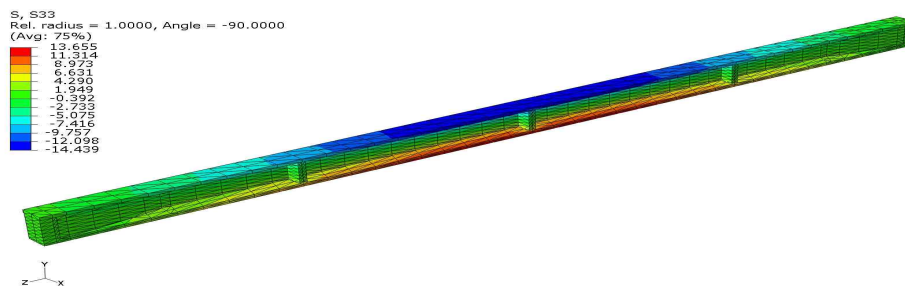
[그림3.1.30] 변단면 PSC No.5 ($h_c=1.7m$)의 최대하중 재하시 응력분포



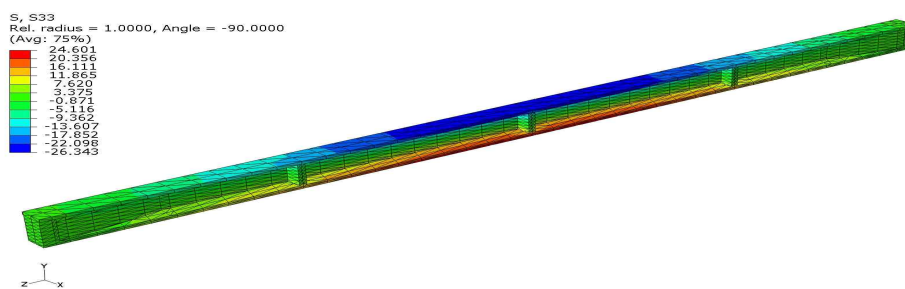
[그림3.1.31] 균등단면 PSC No.11 ($h_c=1.7m$)의 자중에 의한 응력분포



[그림3.1.32] 균등단면 PSC No.11 (hc=1.7m)의 긴장력도입시 응력분포



[그림3.1.33] 균등단면 PSC No.11 (hc=1.7m)의 설계하중 재하시 응력분포



[그림3.1.34] 균등단면 PSC No.11 (hc=1.7m)의 최대하중 재하시 응력분포

모델	하 중	상현플랜지	하현플랜지
PSC No.1 (hc=1.3m)	거더 자중	-12.85	12.60
	긴장력 도입	-9.65	-1.71
	설계하중	-23.05	20.72
	최대하중	-40.83	37.43
PSC No.3 (hc=1.5m)	거더 자중	-11.04	9.80
	긴장력 도입	-7.96	-2.67
	설계하중	-18.53	15.17
	최대하중	-33.60	27.31
PSC No.5 (hc=1.7m)	거더 자중	-8.34	9.73
	긴장력 도입	-5.99	-3.47
	설계하중	-13.53	14.73
	최대하중	-24.51	26.41
PSC No.7 (hc=1.9m)	거더 자중	-8.72	7.89
	긴장력 도입	-5.72	-3.57
	설계하중	-13.22	11.26
	최대하중	-23.93	20.14
PSC No.9 (hc=2.1m)	거더 자중	-7.88	7.14
	긴장력 도입	-4.98	-3.82
	설계하중	-11.42	9.83
	최대하중	-20.66	17.53

[표 3.1.8] 롤러지지 변단면 PSC보의 중앙단면 응력(MPa)

모델	하 중	상현플랜지	하현플랜지
PSC No.2 (hc=1.3m)	거더 자중	-11.76	10.90
	긴장력 도입	-9.55	-1.86
	설계하중	-21.31	18.24
	최대하중	-38.77	33.04
PSC No.4 (hc=1.5m)	거더 자중	-10.46	8.86
	긴장력 도입	-8.00	-2.62
	설계하중	-17.74	13.98
	최대하중	-32.16	25.14
PSC No.6 (hc=1.7m)	거더 자중	-8.07	9.06
	긴장력 도입	-6.06	-3.29
	설계하중	-13.23	14.02
	최대하중	-23.93	25.03
PSC No.8 (hc=1.9m)	거더 자중	-8.54	7.49
	긴장력 도입	-5.79	-3.41
	설계하중	-13.07	10.92
	최대하중	-23.61	19.43
PSC No.10 (hc=2.1m)	거더 자중	-7.79	6.88
	긴장력 도입	-5.04	-3.65
	설계하중	-11.36	9.67
	최대하중	-20.51	17.13

[표 3.1.9] 롤러지지 변단면 PSC보의 중앙단면 응력(MPa)

모델	하 중	상현플랜지	하현플랜지
PSC No.11 (hc=1.7m)	거더 자중	-9.28	10.28
	긴장력 도입	-6.51	-3.77
	설계하중	-15.19	15.63
	최대하중	-27.52	28.01
PSC No.13 (hc=1.95m)	거더 자중	-8.22	8.72
	긴장력 도입	-5.49	-4.14
	설계하중	-12.47	12.42
	최대하중	-23.07	24.45
PSC No.15 (hc=2.2m)	거더 자중	-7.32	7.59
	긴장력 도입	-4.62	-4.57
	설계하중	-10.45	10.45
	최대하중	-19.32	20.56

[표 3.1.10] 롤러지지 균등단면 PSC보의 중앙단면 응력(MPa)

모델	하 중	상현플랜지	하현플랜지
PSC No.11 (hc=1.7m)	거더 자중	-9.18	9.90
	긴장력 도입	-6.56	-3.57
	설계하중	-15.12	15.33
	최대하중	-27.36	27.35
PSC No.13 (hc=1.95m)	거더 자중	-7.94	7.46
	긴장력 도입	-5.54	-3.95
	설계하중	-12.42	12.22
	최대하중	-22.45	21.69
PSC No.15 (hc=2.2m)	거더 자중	-7.12	6.73
	긴장력 도입	-4.67	-4.38
	설계하중	-10.41	10.40
	최대하중	-18.79	18.34

[표 3.1.11] 탄성받침 균등단면 PSC보의 중앙단면 응력(MPa)

(4) 연구결과에 따른 변단면 PC-빔의 아칭 효과

본 연구에서는 변단면 PC-빔의 하현플랜지에 발생하는 아칭효과를 검증하였다. 여러 가지 변단비에 대한 3차원 변단면 수치모델 10종과 3차원 균등단면 수치모델 6종에 대하여 구조해석이 수행되었다. 해석결과의 비교 검토를 통하여 적어도 다음과 같은 결론에 이른다.

(가) 첫째, 실무에서 적용되는 탄성받침은 변단면 PC-빔의 경우에는 아칭효과를 발생시켜서 구조적으로 유리하다. 지간장이 40m인 변단면 PSC빔의 경우에 탄성받침의 영향으로 인하여 처짐과 응력이 각각 2.74% 및 2.98% 감소한다. 반면, 균등단면 PSC빔의 경우에는 탄성받침의 영향이 미미 하다.

(나) 둘째, 변단면 PC-빔은 균등단면 PSC빔 보다 사용성 및 내하력 측면에서 유리하다. 지간장 40m인 탄성받침 변단면 PSC빔의 경우에, 균등단면 PSC빔보다 처짐 및 응력 감소량이 각각 8.56% 및 8.17% 이다. 그러므로 변단면 PSC빔은 미관 측면에서 유리할 뿐만 아니라, 구조적으로도 균등단면보다 유리하다.

2. 변단면 PC-빔 연속화 방안에 대한 실험적 연구

가. 실험교량 계측을 통한 준공교량 실험

(1) 과업의 목적 및 범위

(가) 과업의 목적

본 과업은 변단면 PSC 빔으로 시공된 뮤지엄교의 시공단계에 따른 교량의 거동을 명확히 파악하기 위하여 제작시 1차 긴장, 거더 거치 전·후, 바닥판 타설 후, 2차 긴장시, 사하중 재하 완료 후 각각 계측을 수행하고 시공완료 후 거동특성을 파악하기 위한 정·동적 재하시험을 수행하여 공용 내하력을 평가하는 기초자료를 수집하는 것을 목적으로 한다.

(나) 과업의 범위

- ① 현장 계측시스템 설치 및 데이터 처리
- ② 계측 데이터의 기록
- ③ 시공단계별 계측결과 분석
- ④ 정·동적 재하시험시행 및 계측결과 분석

(다) 과업대상 시설물

공 사 명	양평스파월드 진출입도로 개설공사
교 량 명	뮤지엄교
위 치	경기도 양평군 용문면 삼성리 325-1
형 식	3경간 연속 변단면 PSC Girder
경간구성	$L=40m+40m+40m=120m$
폭 원	$B=13.0m$ (왕복 2차로)
설계하중	DB-24

(라) 위치도 및 전경



[위치 : 경기도 양평군 용문면 삼성리 325-1]



[뮤지엄교 교량전경]

(2) 시공단계별 계측

(가) 시공단계별 계측 관리

① 개요 및 목적

- 시공중 시공의 정밀도를 검증
- 시공중 오차의 원인을 분석하고 정밀도 확인
- 시공단계별 시공의 정밀도 및 시공의 안전성 확인

② 시공 중 계측시스템 운영

- 시공 중 단계별 계측관리의 특성상 필요시 현장 투입, 계측결과를 취득하여 그 결과를 시공에 반영될 수 있도록 구성
- 시공단계별 데이터 취득은 반자동 계측시스템으로 운영
- 시공중 계측항목은 무지엄교 시공 완료 후 재하시험 측정항목으로 이관

③ 계측빈도

시공단계별 정적장비(TDS-303)로 1회/10초 간격으로 측정하여 시공단계별 응력변화의 연속성 및 응력값의 변화를 측정하였다.

시공단계별 순서	계측빈도	비 고
1. 1차 긴장시	1회/10초	· 데이터의 연속성 및 신뢰성 확보를 위해 1회/10(20)초 간격으로 측정
2. 거더 거치전		
3. 거더 거치후		
4. 바닥판 타설후		
5. 2차 긴장시	1회/20초	
6. 사하중 재하완료 후	1회/10초	

[계측빈도]

(나) 시공단계별 계측 순서

시공 단계	시공내용	계측계획
1	• Girder 제작 및 강선 배치	• 계측센서 설치(콘크리트 변형률계) - 연속화 전·후 최대 정모멘트부 설치 - 최대 전단력발생 위치 설치 • 계측센서 설치(철근 변형률계 설치) - 강재의 표면에 설치하여 삽입
2	• 1차 프리스트레스 도입 시	• 계측센서 설치(변위계 설치) - Camber 관리를 위한 변위계 설치 • 1차 계측 - 1차 프리스트레스에 의한 휨응력 및 캠버 측정 - 1차 프리스트레스에 의한 전단응력 측정 - 강선의 긴장력 측정
3	• Girder 거치 전·후	• 2(전), 3(후)차 계측 • 계측센서 설치(콘크리트 변형률계) - 최대 부모멘트부 설치 - 연속화 전 측정
4	• 시간내 가로보 콘크리트 타설	-
5	• 연속화 위한 지점부 시공 및 바닥판 타설 후	• 4차 계측 • 타설 전 지점부 강선부 계측센서 설치
6	• 2차 긴장 시	• 5차 계측 - 바닥판 타설 전 측정 - 프리스트레스에 의한 휨응력 및 연결강선 긴장력 측정
7	• 사하중 재하완료 후	• 6차 계측
8	• 활하중 재하(재하시험)	• 계측센서 설치(변위계 및 가속도계) - 최대 정모멘트부 설치 • 7차 계측 - 정·동적 하중에 의한 교량의 응력 및 처짐, 가속도 측정

[시공단계별 계측 순서]

五世孫

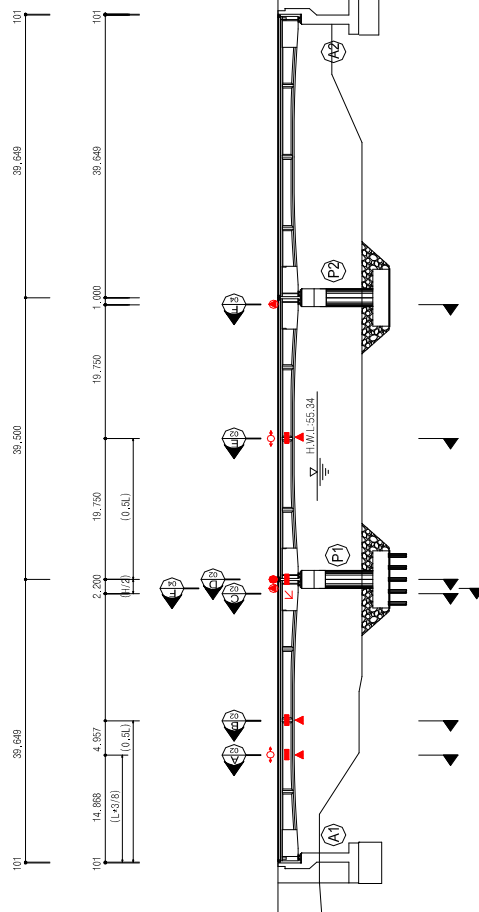
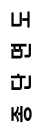
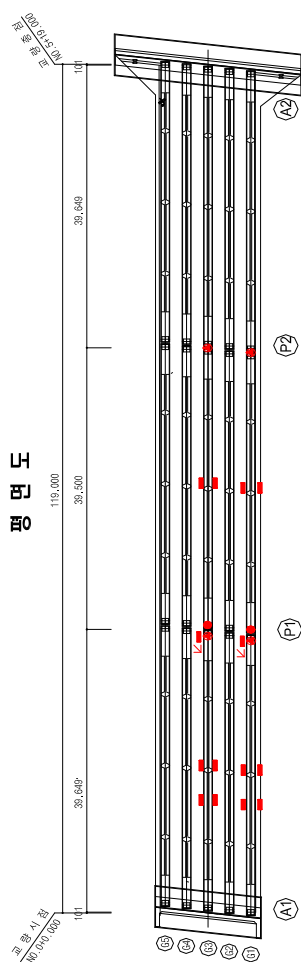


표	시	지속기간	수량(㎏)	비고
●	원근 반향물계	18	대산형(Gilder)	
●	원근 반향물계	60	대산형(강산)	
■	원근 반향물계	36	부향형(Gilder)	
ㄱ	호지반 반향물계	25	1차 3.0구경	
▲	기아계	10	2차사형시	
→	반향물계	2	3차사형시	
③	장력 측정 장치	1	단기형 측정	
④	동력 측정 장치	1	단기형 측정	
계산치로 총 수량			128(132)	수출용에 11 포함

[illegible]

뮤지엄교 계측도

(시공단계별 계측센서 설치도)

A - A 단면		B - B 단면		C - C 단면		D - D 단면		E - E 단면	
1차 계측 1) 1차 긴장 2) 보의 표면에 Con't C Gage설치 - 총 30ea 3) 단단변형률계 - Con't C Gage 2ea (6ea)설치 - 강선 삽입전 Steel Gage설치 - 총 4ea (4/4도면 참조) 4) 1차 긴장전 변위계 설치 - 총 4ea		콘크리트 변형률계 : 10ea 변위계 : 2ea		콘크리트 변형률계 : 6ea (1축 3ea구성) 변위계 : 2ea		콘크리트 변형률계 : 10ea 변위계 : 2ea		콘크리트 변형률계 : 10ea 변위계 : 2ea	
2차 계측 1) 보 거치 후 2) 단부 강선 Steel Gage설치 - 총 12ea 3) 단부 Girder Con't C Gage설치 - 총 6ea		콘크리트 변형률계 : 4ea		철근 변형률계 : 2ea		철근 변형률계 : 4ea		철근 변형률계 : 4ea	
3차 계측 1) 비단면 타설 2) 연속지점 긴장 - 보의 표면에 Con't C Gage설치 - 총 6ea 3) 단부지점에 Steel Gage설치 - 총 8ea		변위계 : 6ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea	
4차 계측 1) 연속지점 긴장 2) 보의 표면에 Con't C Gage설치 - 총 6ea 3) 단부지점에 Steel Gage설치 - 총 8ea		변위계 : 6ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea	
5차 계측 1) 재하시험 2) 변위계 설치 - 총 10ea 3) 가속도계 설치 - 총 2ea		변위계 : 6ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea		변위계 : 5ea 가속도계 : 1ea	
시공단계별 계측센서 설치도		NONE		NONE		NONE		NONE	
3/4		3/4		3/4		3/4		3/4	

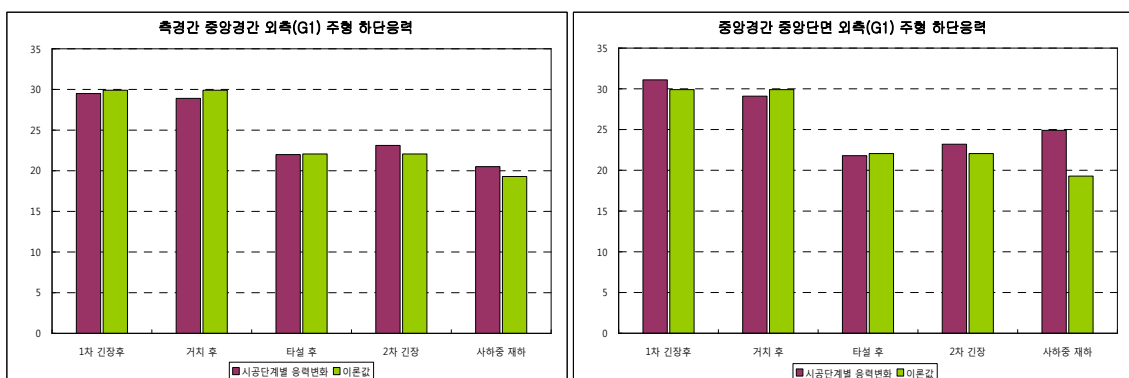
(라) 시공단계별 계측 결과

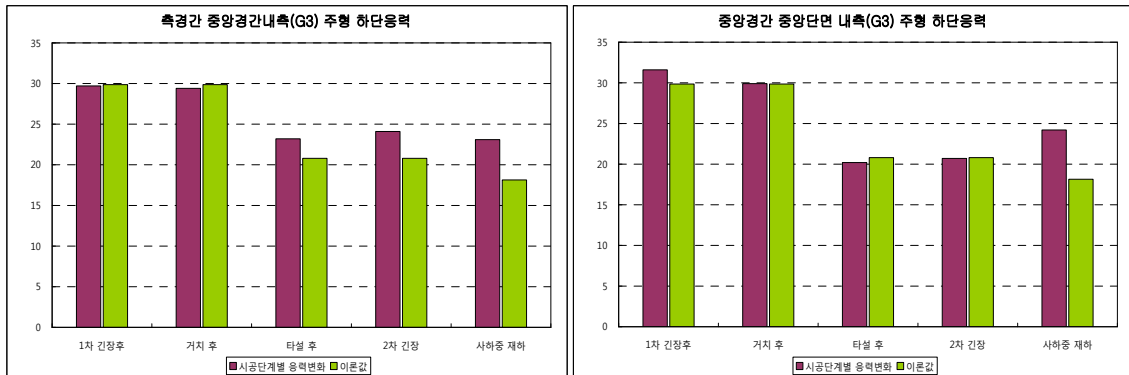
계측 단계별 계측값은 연속성이 없는 것으로 보이나 이는 시공단계별로 계측을 실시하였기 때문에 각 단계별로 하중의 증가가 발생되었고, 초기 도입된 프리스트레스가 시간이 경과함으로서 장기손실이 발생됨으로 인하여 연속성이 나타나지 않은 것은 당연한 것으로 판단되며, 1차 긴장시와 2차 긴장시에는 프리스트레스의 증가에 따라 응력값의 변화가 이론적인 변화와 유사하게 계측되는 것을 고려한다면 계측결과는 신뢰성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

① 계측단계별 정모멘트 구간 주형 하단 응력변화 분석

㉔ 콘크리트 변형률계에 의해 측정된 주형 하단 응력을 분석한 결과 주요 시공단계별 응력 변화는 구조계산서의 이론값과 유사한 거동상태를 나타내고 있어 계측결과는 신뢰성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

㉕ 주형 하단의 응력은 이론값보다 다소 차이를 보이는 사하중 재하단계를 제외하고는 모든 단계에서 구조계산 값과 매우 유사하게 측정되었으며, 1차 프리스트레스 도입시 실시한 강선의 긴장력을 추정한 결과 타단부 이론값 대비 0.95~1.05 범위로 분석된 점을 고려한다면, 뮤지엄교 주형 하단에 도입된 응력은 적정한 것으로 판단된다.



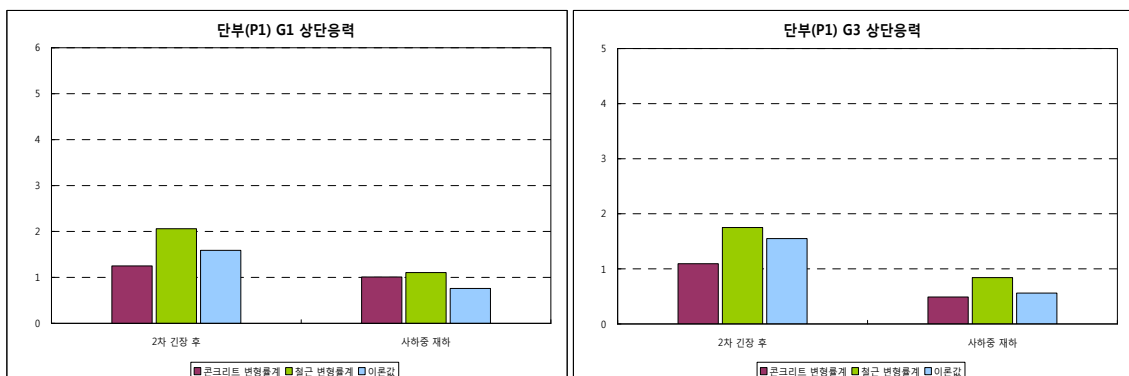


[측경간 및 중앙경간 주형 하단 응력]

② 계측단계별 부모멘트 구간 주형 상단 응력변화 분석

㉑ 철근 및 콘크리트 변형률계의 계측된 결과를 콘크리트 응력으로 환산하여 분석하였으며, 철근 변형률계 응력값은 이론적인 응력값과 유사한 응력분포를 보이고 있으며, 콘크리트 변형률계의 경우 이론값보다 적은 압축응력이 도입된 것으로 나타났으나 지점부에 설치할 수 없는 조건이어서 단부로부터 1m 떨어진 보의 측면에 부착하여 상반된 값이 계측된 것으로 판단된다.

㉒ 2차 프리스트레스 도입시 단부 연결강선의 중앙부 긴장력을 추정한 결과 이론값 대비 0.96~1.03범위로 분석된 점을 고려한다면, 2차 프리스트레스 도입에 의한 연속보 효과 및 상단의 압축력 도입은 반영된 것으로 판단된다.



[주형 상단 응력]

③ 바닥판 계측결과 분석

바닥판에서 계측된 최대 사하중응력(f_d)는 52.56MPa이므로 활하중에 대한 허용 가능응력 ($f_{sa} - f_d$)는 127.4MPa이나, DB-24에 의한 응력은 86.9MPa이므로 설계하중에 대해 안전율은 1.5정도로 확보하고 있는 것으로 판단된다.

④ 1차 바닥판(SP판넬) 시공단계별 계측결과 분석

㉔ 1차 긴장을 실시한 결과 측경간 및 중앙경간의 중앙부에서 발생한 솟음은 이론값 대비 1.09~1.33 범위내에서 발생하였으며, 강선 긴장에 의한 효과는 적정하게 발생된 것으로 판단된다.

㉕ 2차 긴장시 솟음 측정결과 최대 측경간 3L/8지점 0.24mm, 중앙경간 중앙부 0.65mm 발생하였으며, 2차 긴장시 솟음에 대한 거동은 미세하게 발생된 것으로 계측되었다.

(단위 : mm)

경 간 Girder	측경간			중앙경간		
	계측값	이론값	계측값/이론값	계측값	이론값	계측값/이론값
G1	33.71	31.0	1.09	37.44	31.0	1.21
G3	38.66	31.0	1.25	41.34	31.0	1.33

[2차 긴장에 따른 최종 캠버 정리]

(마) 시공단계별 프리스트레스도입에 의한 긴장력 측정

① 1차 프리스트레스 도입시 긴장력 계측결과

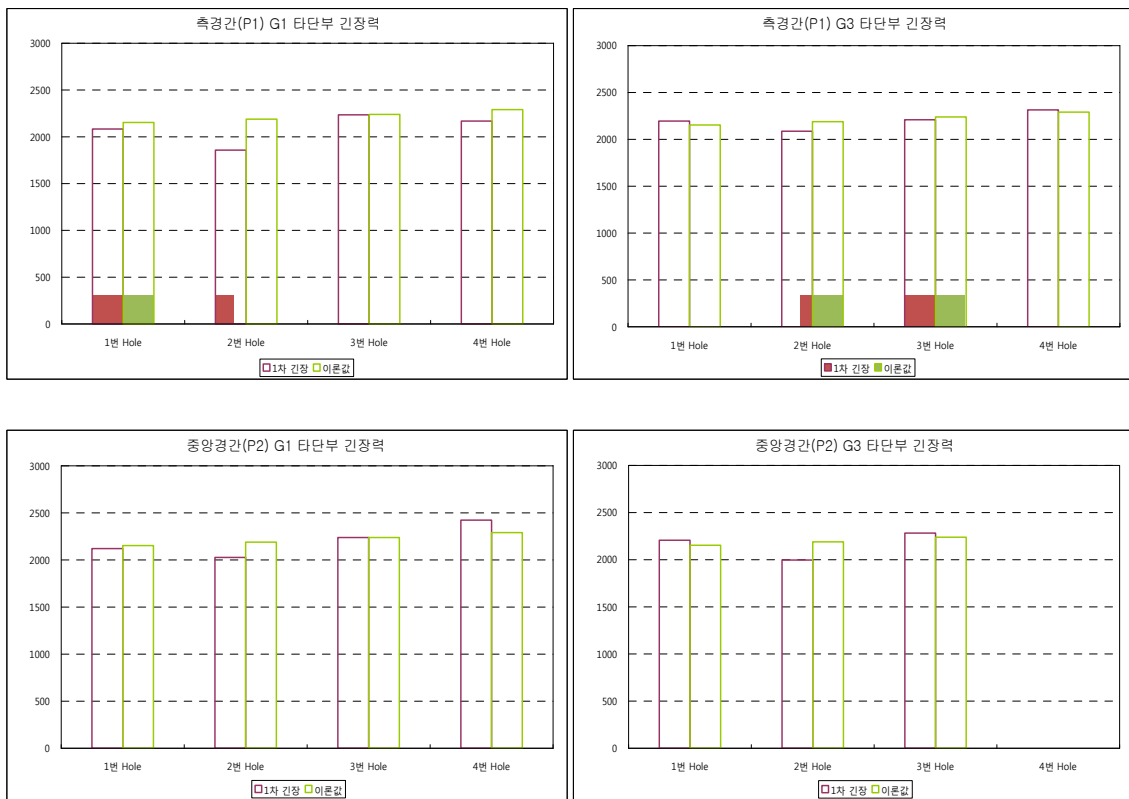
㉔ 1차 프리스트레스 도입 전 타단부에서 1m 이격하여 강선 HOLE별 강선(1ea/15)에 계측센서를 3개소 설치하여 평균값을 산정하여, 긴장력을 추정하였다.

㉕ 시공 단계별 계측값은 거치 후 및 바닥판 타설 후, 사하중 재하 후 하중증가가 발생되어 연속성이 나타나지 않은 것은 당연한 것으로 판단되며, 2차 긴장에 의한 변화는 미세한 것으로 측정되었다.

㉖ 1차 프리스트레스 도입시 측정한 결과 프리스트레스의 증가에 의해 강선의 응력 변

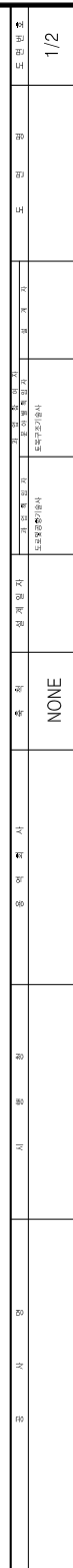
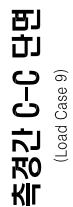
화가 하중 증가에 따라 연속성을 가지고 단계별 변화를 가지고 있으며, 긴장순서는 2, 3, 4, 1 Hole 순서로 프리스트레스를 도입하였다. 전체적으로 처음 도입한 2Hole의 타단부에서 측정한 긴장력은 이론값 대비 0.85~0.95범위로 동일한 거더 타단부 계측센서 설치 위치의 경우보다 작게 측정되었다.

㉔ 상기원인은 처음(2 Hole) 프리스트레스 도입에 따른 여러계수와 강선과 쉬스의 마찰 등에 의하여 긴장순서에 의한 긴장력 변화가 발생하였다고 판단되며, 긴장단계 및 하중 증가에 의해 점차적으로 프리스트레스 도입이 원활하게 이루어 졌다고 판단된다. 전체적으로 이론값 대비 0.95~1.05의 범위로 분석되어 1차 프리스트레스 도입은 적정하다고 판단된다.



[1차 프리스트레스 도입시 강선 긴장력 Graph]

뮤지엄교 재하시험 계획도



③ 재하차량

본 교량은 왕복 2차선 교량이며 재하시험시 실거동의 응답특성을 알기 위하여 27톤 덤프트럭 1대를 시험트럭으로 사용하였으며, 총중량 및 축중은 다음과 같다.

구 분	ℓ 1 (m)	ℓ 2 (m)	ℓ 3 (m)	ℓ 4 (m)	총중량 (tonf)	전륜 (tonf)	중륜 (tonf)	후륜 (tonf)	차량 NO.
1	1.35	3.20	2.05	1.85	27.16	5.432	10.864	10.864	5149

[시험차량 제원 및 축중하중]

(나) 정적 재하시험 결과 및 분석

① 측정결과

단위 : 변 위(mm)

구 분		측경간 3/8L A-A단면					중앙경간 1/2L E-E단면					단 면
		G1	G2	G3	G4	G5	G1	G2	G3	G4	G5	
LC1	외 측	-1.939	-1.665	-1.379	-0.984	-0.484	0.342	0.329	0.266	0.300	0.274	A (측경간 3L/8)
LC4		-0.500	-0.945	-1.324	-1.653	-1.852	0.289	0.286	0.293	0.318	0.305	
LC2	내 측	-1.476	-1.603	-1.564	-1.150	-0.749	0.334	0.324	0.299	0.325	0.301	
LC3		-0.762	-1.110	-1.505	-1.662	-1.494	0.251	0.278	0.238	0.306	0.309	
LC5	외 측	-2.011	-1.768	-1.423	-1.028	-0.519	0.386	0.375	0.327	0.351	0.330	B (측경간 중앙)
LC8		-0.507	-0.874	-1.367	-1.811	-1.964	0.369	0.374	0.443	0.427	0.391	
LC6	내 측	-1.635	-1.722	-1.493	-1.275	-0.880	0.416	0.388	0.385	0.427	0.362	
LC7		-0.868	-1.286	-1.465	-1.706	-1.589	0.377	0.360	0.380	0.384	0.371	
LC9	-	-0.458	-0.343	-0.257	-0.169	-0.045	0.026	0.065	0.066	0.145	0.193	C
LC10	외 측	0.366	0.320	0.327	0.382	0.323	-1.641	-1.419	-1.050	-0.758	-0.328	E (중앙경간 중앙)
LC13		0.374	0.362	0.431	0.436	0.436	-0.324	-0.688	-0.972	-1.374	-1.593	
LC11	내 측	0.379	0.341	0.378	0.394	0.354	-1.301	-1.272	-1.106	-0.895	-0.589	
LC12		0.385	0.347	0.426	0.420	0.401	-0.601	-0.863	-1.069	-1.307	-1.240	

[정적재하시험 처짐계 측정결과]

② 활하중 횡방향 분배 분석결과

측경간 중앙단면에 좌우대칭으로 하중을 재하하여 활하중의 횡분배 효과를 분석한 결과 상호 대칭되는 보의 처짐량의 비가 측경간 : 0.968~1.080, 중앙경간 : 0.965~1.049의 범위에 분포하고 있으며, 양호하게 활하중을 횡방향 분배하고 있는 것으로 판단된다. 또한 내·외측주형의 최대 활하중 분담율을 산정한 결과 외측주형 : 0.295~0.322, 내측주형 : 0.245~0.257의 범위로서 모든 주형이 거의 일정하게 활하중을 분담하고 있는 것으로 나타났다.

③ 중립축 분석결과

계산상 단면의 특성과 실제 단면의 특성이 일치하는지의 여부를 판단하기 위하여 정적재하시험에서 측정된 변형률 값을 활용하여 중립축 위치를 분석하였다. 중립축 분석결과 재하시험 결과 총 12회의 하중 경우의 수에 대해 중립축을 산정한 결과 콘크리트 변형률계의 중립축은 1.160~1.262m범위로 산정되었으며, 이론 중립축 높이 대비 2.8%로서 실제 구조물에서도 이론적으로 표현되는 합성작용을 하고 있는 것으로 나타나 체계적인 이론을 바탕으로 설계된 교량으로 판단된다.

(다) 동적 재하시험 결과 및 분석

① 고유진동수 분석결과

고유진동수 분석은 동적재하시험 중 가속도계로 측정된 계측값을 이용하여 실시하였으며, 측경간 및 중앙경간 중앙부 인도외측에 각 1개소 설치하였다. 고유진동수 분석결과 측경간 1차 모드는 1.823Hz, 2차 모드는 2.246Hz로 측정되었으며, 중앙경간 1차 모드는 1.823Hz, 2차 모드는 2.696Hz로 산정되었다.

② 충격계수 분석결과

충격계수는 각속도별로 측정된 처짐값을 이용하여 산정하였으며 각 주형별로 Low Pass Filter를 실시하여 충격계수를 산정하였다. 각 속도별 대표 충격계수는 최대 활하중 효과가 발생하는 주형의 충격계수를 적용하였다. 동적재하 시험결과 최대 충격계수는 측정간 0.126, 중앙경간 0.122로 산정되었다.

구 분	측정간	중앙경간
최대 충격계수	0.126	0.122

[충격계수 산정]

(라) 구조해석 및 내하력 산정결과

① 최대 정모멘트 구간 내·외측 주형에 대해서 균열모멘트를 검토한 결과 $\phi M_n/M_{cr}$ 이 1.28로서 요구조건인 1.2이상을 만족하고 있어 균열발생에 대한 안전율을 확보하고 있으며, 내측 주형 휨강도 검토결과 22,646kN·m(외측 : 22,571kN·m)인 반면 극한하중(계수하중)에 의한 설계모멘트는 16,837kN·m(외측 : 16,069kN·m)로서 DB-24하중에 대한 파괴에 대한 안전율이 1.35(외측 : 1.40)정도 확보하고 있는 상태이다. 또한 재하시험에 의한 응답비를 산정한 결과 전체적으로 1.0이상으로 산정되어 계산 처짐값이 실측 처짐보다 더 크게 산정되고 있어 실제구조물은 계산시 적용한 강성보다 더 큰 강성을 확보하고 있으므로 뮈지엄교는 DB-24이상의 내하력을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

② 최대 부모멘트에 대한 내·외측 주형 균열발생여부를 검토한 결과 $\phi M_n/M_{cr}$ 이 1.32로서 요구조건인 1.2이상을 만족하고 있어 균열발생에 대한 안전율을 확보하고 있으며, 내측 주형 휨강도 검토결과 14,767kN·m(외측 : 14,406kN·m)인 반면 극한하중(계수하중)에 의한 설계모멘트는 5,210kN·m(외측 : 5,598kN·m)로서 DB-24하중에 대한 파괴에 대한 안전율이 2.8(외측 : 2.6)을 확보하고 있으며 재하차량 재하시 인접경간의 솟음에 대한 응답

비를 산정한 결과 응답비가 1.0을 초과하고 있어 DB-24이상의 내하력을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

③ 바닥판에 대한 재하시험 차량 재하시 응답비를 산정한 결과 전체적으로 1.0이상으로 산정되어 계산 응력값이 실측 응력보다 더 크게 산정되고 있어 실제구조물은 계산시 적용한 강성보다 더 큰 강성을 확보하고 있으므로 뮤지엄교는 DB-24이상의 내하력을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

④ 공용 내하력 평가를 위해 정적응답계수와 동적응답계수를 적용하여 산정된 변위응답 보정계수는 측경간 내·외측주형은 1.281로 동일하게 나타났으며, 중앙경간 외측주형은 1.395, 내측주형은 1.572로 1.0보다 크게 나타났다.

⑤ PSC-Beam교에서 거더의 Full-stressing조건을 만족하는 가를 검토하기 위하여 허용응력 개념의 내하율을 산정한 결과 기본 내하율이 측경간과 중앙경간은 2이상으로 나타났으며, 공용 내하율은 측경간은 3이상, 중앙경간은 4이상으로 나타나 DB-24 내하력을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

⑥ 거더의 파괴에 대한 내하력을 산정하기 위하여 강도설계법에 의한 내하율을 산정한 결과 기본 내하율이 측경간 및 중앙경간은 3이상으로 나타났으며, 공용 내하율은 측경간은 4이상 중앙경간은 5이상으로 나타나 DB-24 내하력을 충분히 확보하고 있는 것으로 판단 된다.

(마) 결론

① PS 강선의 긴장에 의해 현재 도입되어 있는 응력은 정·부 모멘트 부 및 강선 긴장력 계측결과를 기준으로 설계시 산정된 응력과 동일하게 도입되어 있는 것으로 판단된다.

② 1차 긴장을 실시한 결과 측경간 및 중앙경간의 중앙부에서 발생한 솟음은 이론값 대비 1.09~1.33 범위내에서 발생하였으며, 2차 긴장시 솟음 측정결과 최대 측경간 3L/8지점 0.24mm, 중앙경간 중앙부 0.65mm로 매우 미세하게 발생된 것으로 계측되었다.

측경간 및 중앙경간의 지간 중앙에 부착한 변형률계의 응력값과 강선의 긴장력을 측정한 결과를 고려한다면 강선긴장에 의한 효과는 반영된 것으로 판단된다.

③ 정재하시험결과 중립축위치는 이론적인 중립축과 거의 일치하는 위치에서 중립축이 형성되고 있으며, 중첩도 및 횡방향 분배효과를 분석한 결과 매우 양호한 상태로서 27ton 중량의 덤프트럭 1대에 대해서 완전 탄성거동을 하고 있는 것으로 판단된다.

④ 동적 재하시험결과 이동하중에 대한 처짐곡선 및 변형을 곡선이 주행의 연속성을 유지하고 있는 것으로 판단된다. 고유진동수 분석결과 측경간 1차 모드는 1.823Hz, 2차 모드는 2.246Hz로 측정되었으며, 중앙경간 1차 모드 1.823Hz, 2차 모드 2.696Hz로 측정되었다. 또한 충격계수를 검토한 결과 구조설계기준에서 제시하고 있는 충격하중보다 작게 측정되어 동적하중에 대한 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

⑤ 구조 안전성 검토결과 설계하중에 대해서 정·부모멘트 구간 모두 균열발생 가능성이 없는 것으로 산정되었으며, 주형의 경우 파괴안전성에 대한 검토 결과 안전율이 1.3이상이고, 정재하시험의 응답비를 산정한 결과 정·부모멘트 구간 및 바닥판 모두 1.0이상을 초과하고 있어 뮈지엄교는 DB-24이상의 내하력을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

나. One Shoe System 적용성 검토 시험

(1) 과업의 개요

본 시험은 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 관한 연구의 일환으로 연속교에 있어 연속지점부 One Shoe System 적용을 위하여 개발된 교량받침의 구조적 안전성을 확인하고 실용화 하기 위한 시험 연구이다.

(2) 과업의 목적

개발된 교량받침은 기존의 인상에 의한 설치 방법 등 시공방법의 문제점들을 해결하기 위하여 탈부착이 가능한 임시부재에 의해 수직변위가 구속된 상태로 상부구조물을 받칠 수 있기 때문에 교량을 시공할 때 별도의 유압잭 등으로 상부구조물을 인상하는 작업이 필요없는 교량받침 및 교량의 시공방법을 제공함으로써 공사기간 및 공사비를 감소시키는 것을 목적으로 하고 있다.

(3) 과업의 내용

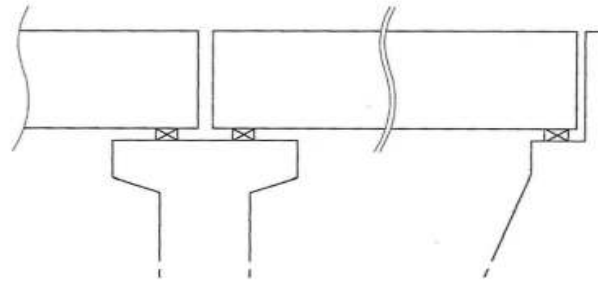
① One Shoe System의 개발 배경

PC-빔의 연속교는 연속지점부의 교각에 2개의 교량받침을 설치하여 거치하는 것이 일반적이다. 이는 단순교 거동을 기본으로 하는 PC-빔 설계개념에 근거하여 그 동안 타당하게 인식되어 설계 및 시공되고 있다.

하부구조물(교각) 상에 2개의 교량받침을 설치함에 따라 교량 전체적으로 볼 때 설치개수가 많아지게 되며, 이는 전체 공사비의 상승과 함께 완공 후 공용단계에서 유지관리에 대한 문제가 따를 수 밖에 없다.

또한 구조적으로는 연속지점부에 인접하는 PC-빔의 양단에 2개의 교좌장치를 설치함에 따라 상부 활하중에 의한 PC-빔 부재 회전각의 변화가 심하여 부재력 값의 변화가

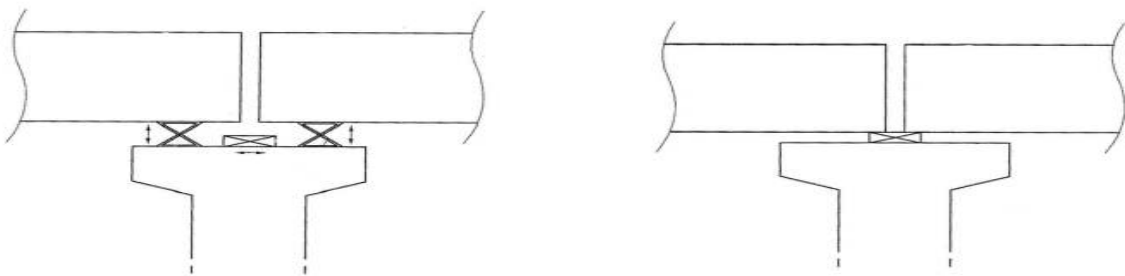
커지게 되고, 교좌부에 발생하는 반력이 어느 특정한 하중조건하에서는 서로 균형을 이루지 못하여 2개의 교좌장치 중 1개의 교좌장치에 하중이 편중됨으로써 허용하중 이상의 과도한 반력이 발생하는 구조적 문제가 있다.



[그림 3.2.1] 교좌장치 2개 설치시

② 기존의 One Shoe 설치 방법

최근 들어 PC-빔에 있어서 교좌장치를 [그림 3.2.1]과 같이 하나의 상부구조물을 받치도록 설치될 수도 있고, [그림 3.2.2]와 같이 복수의 상부구조물을 동시에 받치도록 설치될 수도 있다.



[그림 3.2.2] 교좌장치 1개 설치시

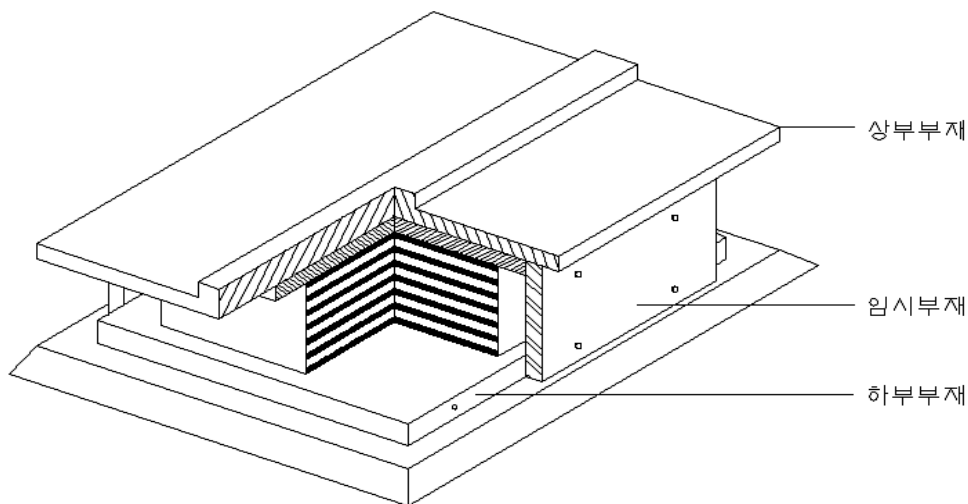
상부 구조물을 설치 할 때에는 먼저 교각 위에 2개의 상부 구조물을 각각 받치도록 2개의 임시받침을 설치하여 2개의 임시받침 위에 2개의 상부 구조물을 각각 얹혀 놓은 다음, 상부 구조물을 인상할 수 있는 유압잭 등의 인장장치를 설치한 후 상부 구조물을 인상한다.

상부 구조물을 인상하고 나면 교각 위 교량받침의 위치조정을 실시하고, 유압잭 등의 인상장치를 작동시켜 상부구조물을 실제 설치높이로 인하여 교량받침에 안착시키며, 인상장치는 철거된다.

이러한 시공방법은 유압잭 등의 인상장치에 대한 상부 구조물의 가설작업으로 인해 공사기간이 길어지고, 유압잭 등의 인상장치 사용에 따른 비용이 소요되는 점이 시급히 개선되어야 할 문제점으로 지적되고 있다.

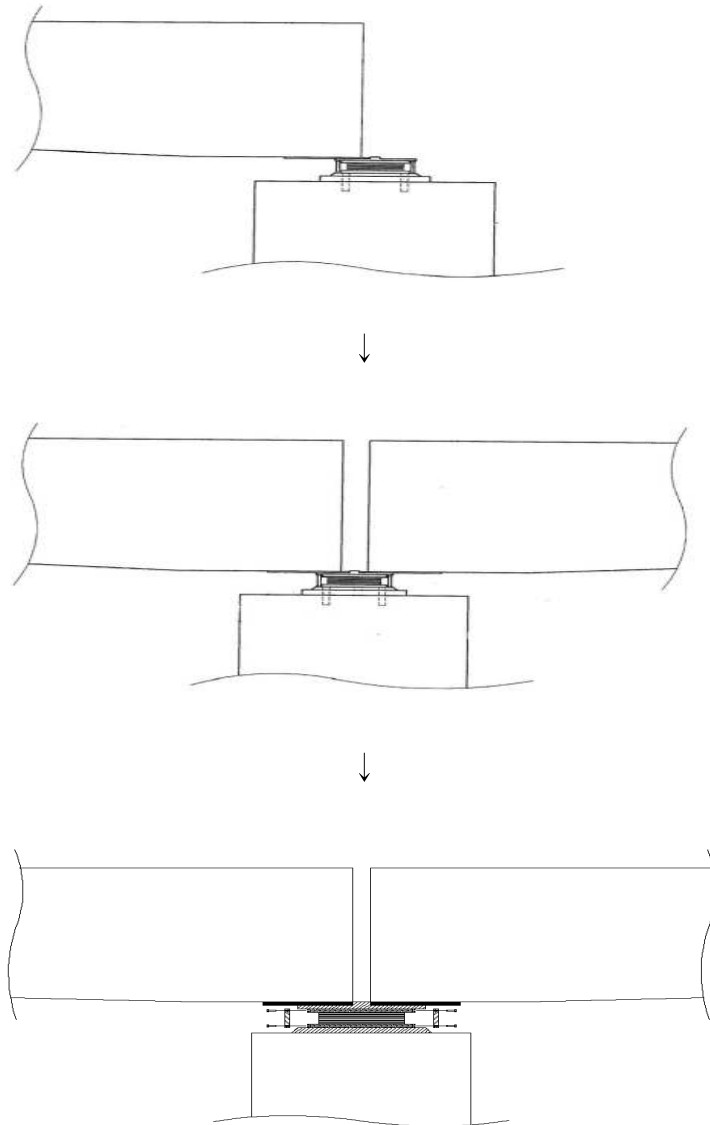
③ 개발된 One Shoe System 방법

개발된 교좌장치는 [그림 3.2.3]과 같이 상부부재와 하부부재 중 적어도 하나에는 수직 변위를 임시로 구속하는 임시부재가 탈부착이 가능토록 체결되는 임시 체결부가 구비된 것을 특징으로 한다.



[그림 3.2.3] 개발된 One Shoe System 방법

시공방법은 [그림 3.2.4]와 같이 하나의 교량받침 위에 함께 안착되는 2개의 상부구조물 중 하나를 설치된 한쪽 위에 안착시키고, 나머지 하나를 설치된 교량받침의 다른 한쪽 위에 안착시키며, 임시부재를 탈거하는 순서로 시공된다.



[그림 3.2.4] One Shoe System 시공방법

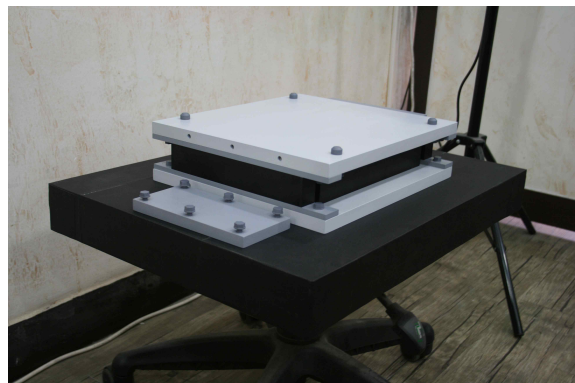
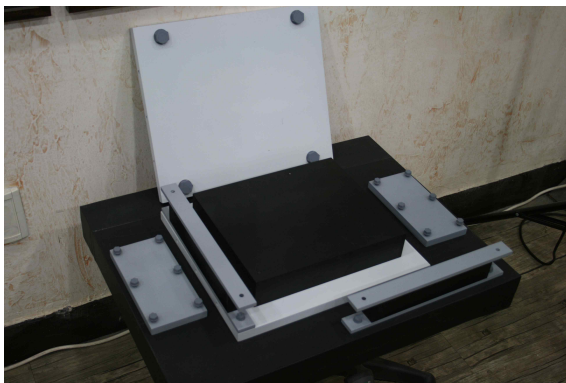
④ 특허출원

변단면 PC-빔 연속교에 있어서 연속지점부 받침의 합리적인 방안 연구를 통해 상기와 같은 방안을 도출하였으며, 이는 협동연구기관인 (주)한국해외기술공사와 교좌장치 제작 업체인 아이컨엔지니어링(주)와 함께 교량받침 및 교량의 시공방법에 대해 공동으로 특허 출원(10-2010-0033146)하였다.

(4) 실물모형 제작 및 시험체 제작

① One Shoe 모형 시작품

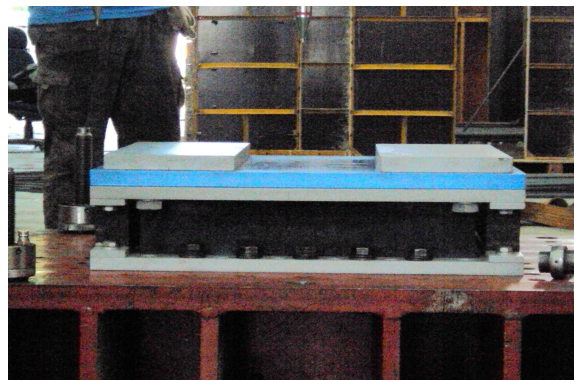
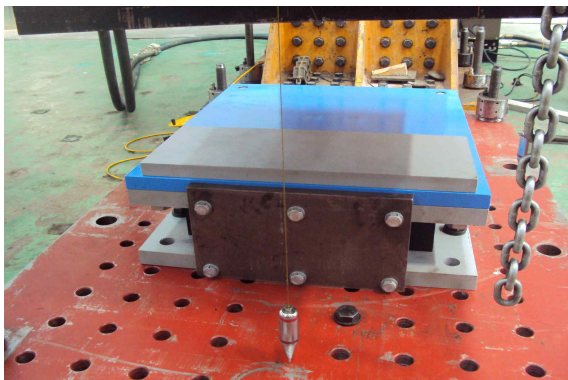
본 연구와 관련하여 One Shoe System의 적용을 위하여 연구결과로 도출된 방안의 연구결과를 확인하고, 실용화 하기 위해 실물모형의 시작품을 제작하였다. 모형의 크기는 40m 연속교의 연속지점부 교각부에 설치될 수 있는 3,500KN 용량의 실물크기 1/2로 제작 되었다.



[One Shoe 모형 시작품]

② 재하시험용 One Shoe 시험체

제작된 교좌장치는 상부부재와 하부부재 중 적어도 하나에는 수직변위를 임시로 구속하는 임시부재가 탈부착이 가능토록 체결되는 임시 체결부를 두 가지 방법으로 별도 제작하여 실험을 통하여 변위 및 시공성을 확인하고자 주문제작 하였다.



[One Shoe 시험체 2TYPE]

(5) 재하시험 방법

① 시험개요

본 시험은 시공순서에 맞추어 단계별 하중을 재하시켜 교좌장치의 거동 및 구조적 안전성을 검토하고자 한다.

② 시험하중

45m 변단면 PC-빔 연속교를 기준으로 재하하중을 단계별로 구분하여 재하 시킨다.

㉠ 대상 하중 : 45m 연속교 변단면 PC-빔 하중(약 1,400 KN)

㉡ 하중 산정

- 빔하중 $\times$ 하중계수 = $1,400 \times 1.4 = 1,960$ KN
- 빔하중이 하부구조물 거치시 교대 및 교각부에 1/2씩 적용 : 960 KN
- 시험하중 1,000 KN 재하

㉢ 단계별 하중

STEP 1 : 합성전고정하중(거더자중) - 편측재하

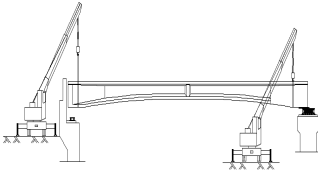
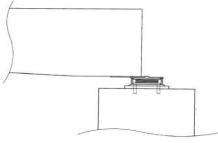
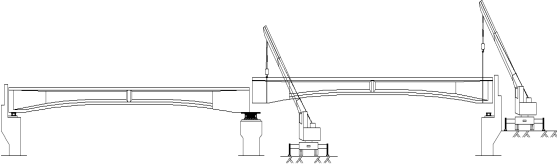
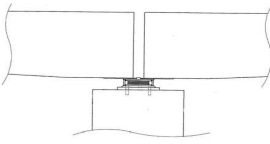
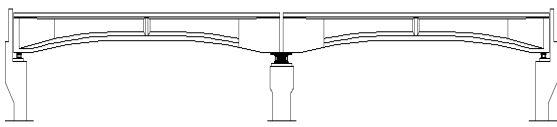
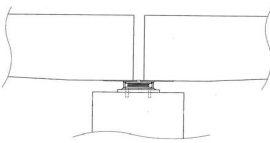
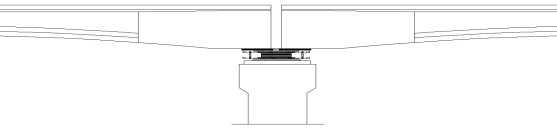
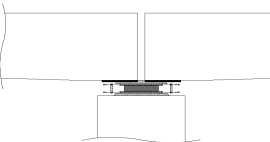
STEP 2 : 합성후고정하중(슬래브 및 지점부 콘크리트) - 양측재하

STEP 3 : 활하중 - 양측재하

④ 시험 순서

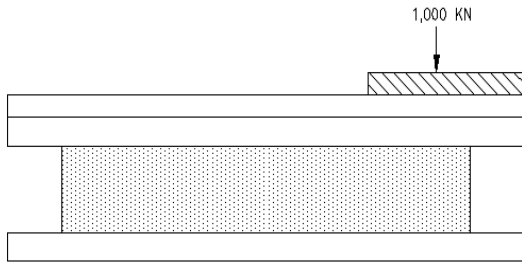
다음과 같은 방법으로 거더 가설시 거더 고정하중에 의한 외력을 재하하여 임시부재의 변위 및 제거 등을 계측 실시한다.

- 임시부재가 없는 상태의 교좌장치의 변위량 측정
- 임시부재 체결 후 교좌장치 임시부재의 변위 및 볼트 탈락여부
- 볼트 해체 및 임시부재 제거 여부

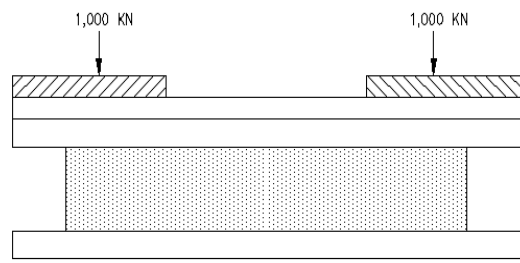
변단면 PC-빔 연속교 가설순서도	상 세	비 고
		측경간 거더 가설 (편측재하)
		인접 거더 가설 (양쪽 재하)
		가설 완료
		임시부재 탈거

[변단면 PC-빔 연속교 가설순서도]

㉔ 임시부재가 없는 상태에서의 재하시험

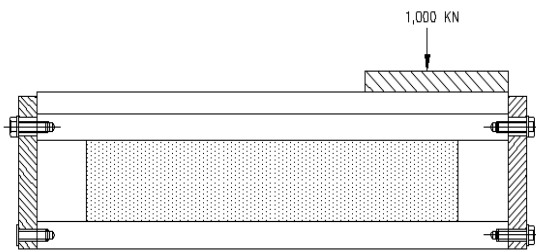


[측경간 거더 가설 (편측재하)]

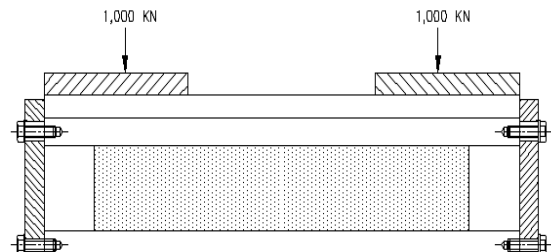


[양측 거더 가설 (양쪽재하)]

㉕ 임시부재 1안의 재하시험

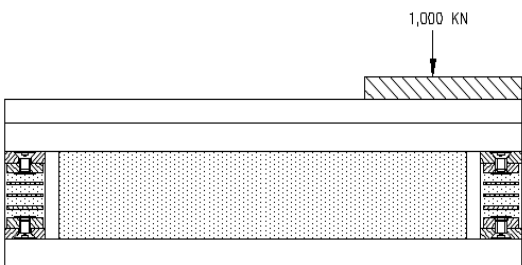


[측경간 거더 가설 (편측재하)]

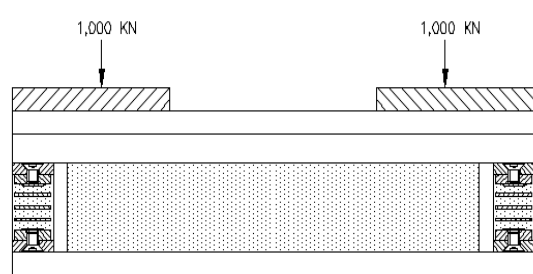


[양측 거더 가설 (양쪽재하)]

㉖ 임시부재 2안의 재하시험



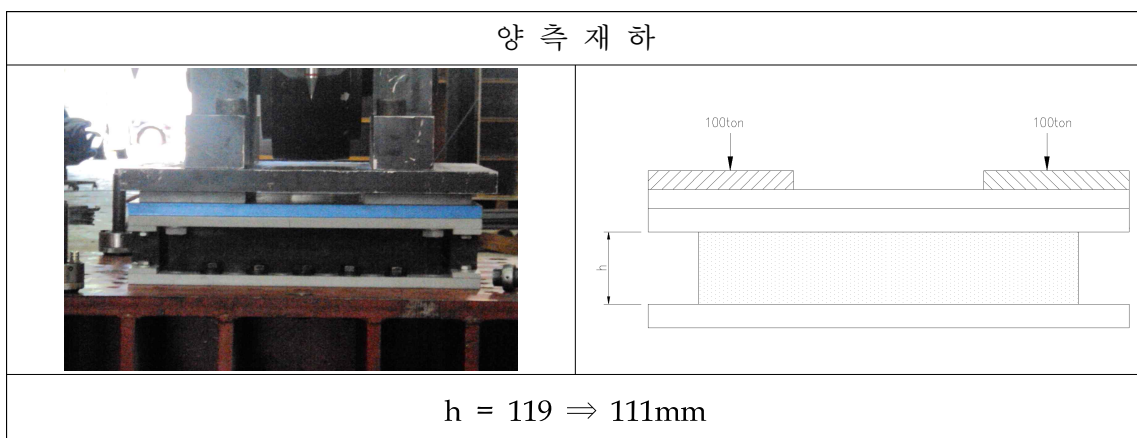
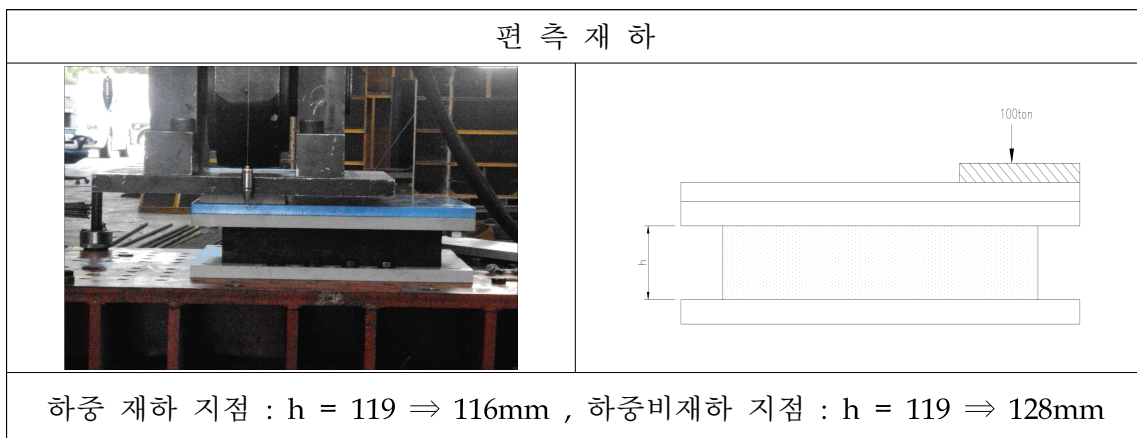
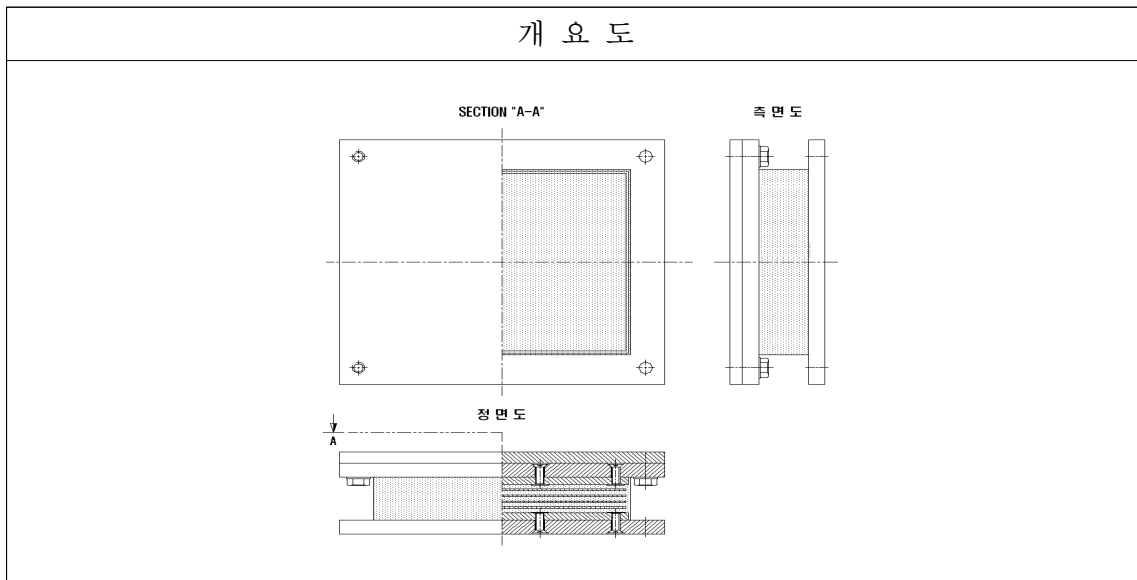
[측경간 거더 가설 (편측재하)]



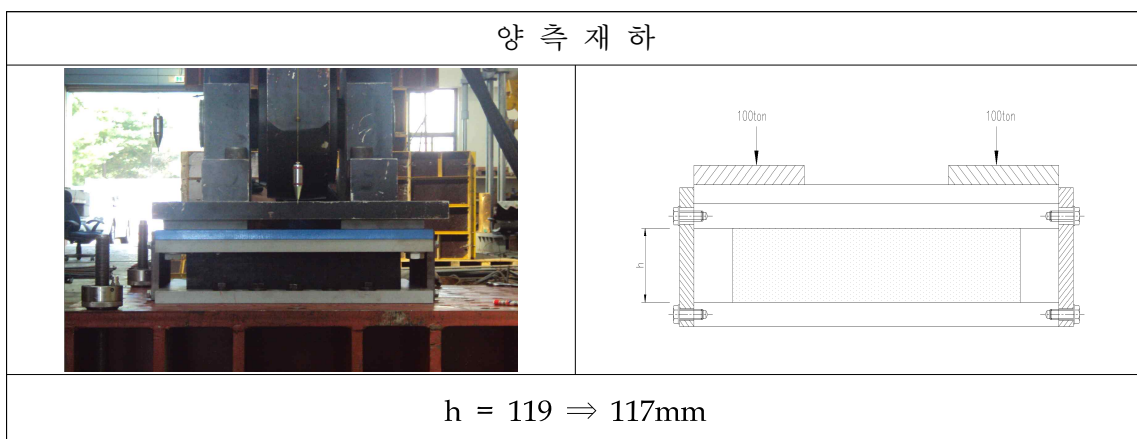
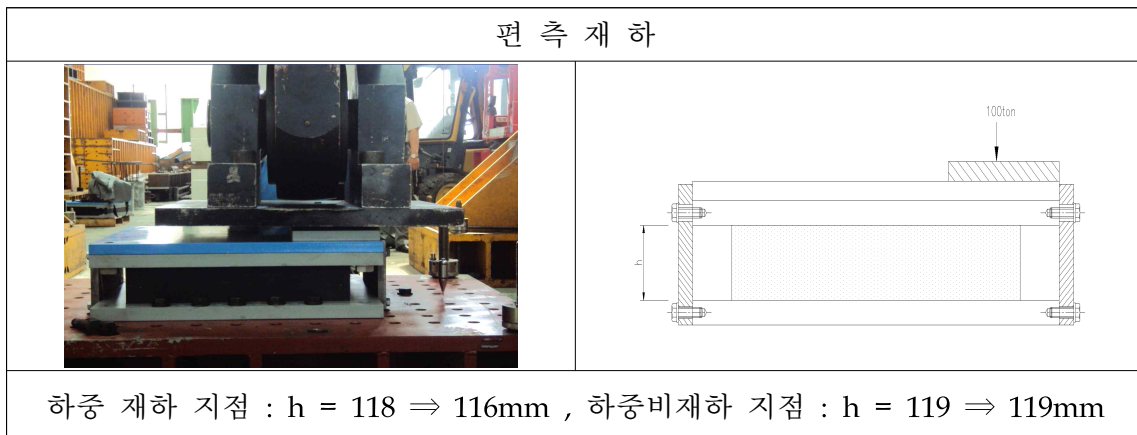
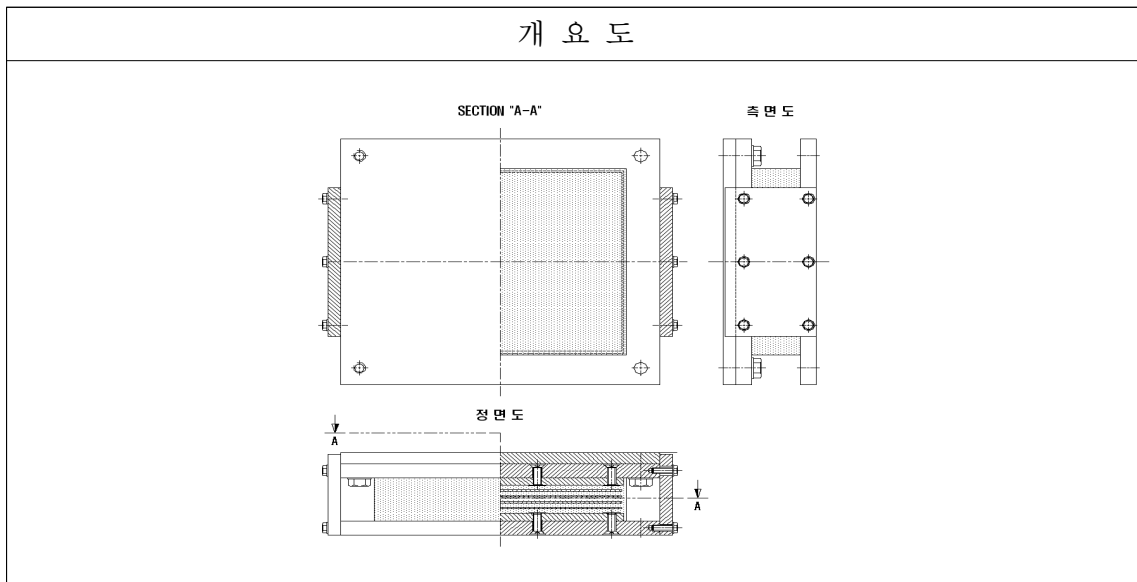
[양측 거더 가설 (양쪽재하)]

(6) 재하시험 결과

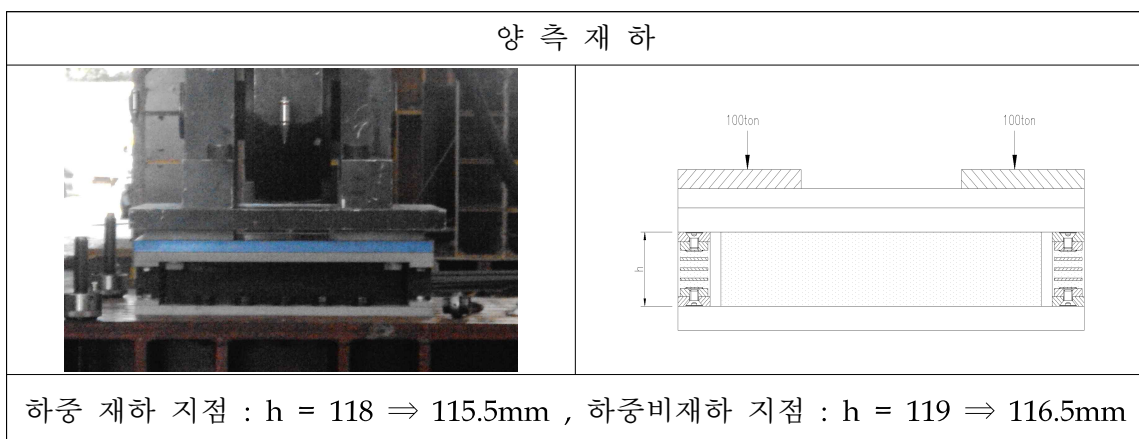
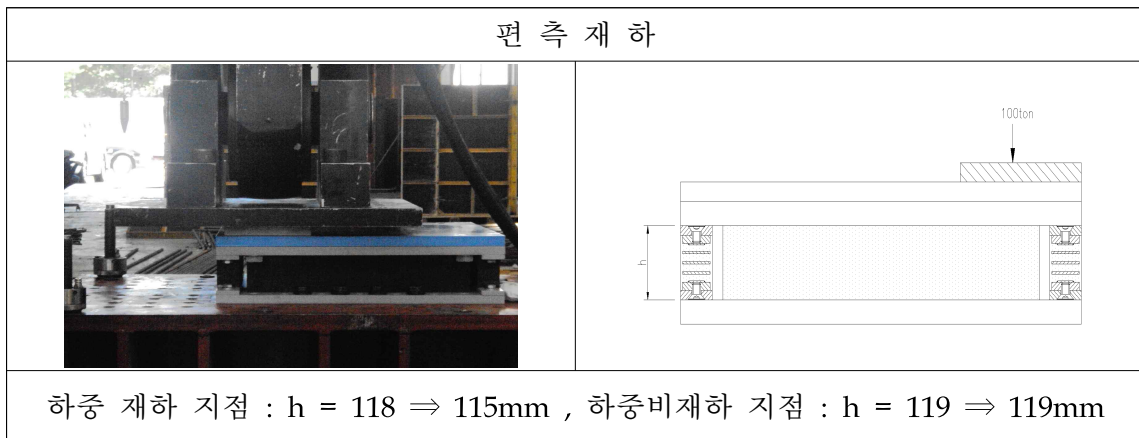
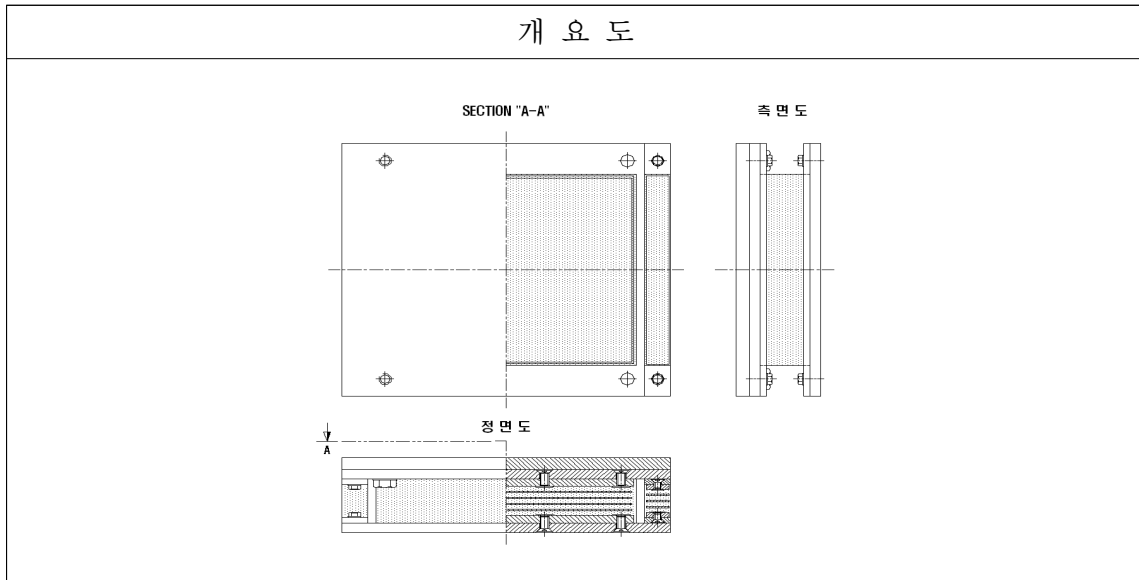
㉑ 임시부재가 없는 상태에서의 재하시험



㉔ 임시부재 1안의 재하시험



㉔ 임시부재 2안의 재하시험



(7) 연구결과에 따른 향후 계획

상기의 시험연구 결과에 따라 개발된 교량받침은 기존의 인상에 의한 설치 방법 등 시공방법의 문제점들을 해결하는데 있어서 탈부착이 가능한 임시부재에 의해 수직변위가 구속된 상태로 상부구조물을 받칠 수 있다는 결과를 얻었다.

교량을 시공할 때 별도의 유압잭 등으로 상부구조물을 인상하는 작업이 필요없는 교량받침 및 교량의 시공방법을 제공함으로써 공사기간 및 공사비를 감소시키는 것이 목적이기 때문에 추후 실교량 적용에 따른 추가적인 연구를 필요로 하고 있다.

한편, 개발된 One Shoe System은 변단면 PC-빔 뿐만 아니라 타형식 교량에도 별도의 장치없이 적용될 수 있기 때문에 설치되는 교량의 제원이나 도로의 선형 등 전체적인 제반사항 하에서 두루 적용될 수 있도록 연구를 추가적으로 진행하여 2011년 성과품 부터는 설계 및 실교량에 적용될 수 있도록 목표를 두고 있다. 이에 다음의 연구들을 자체적으로 진행될 예정이다.

구 분	연구 내용
적용성 검토	곡선교에서 Sole Plate 와 Upper Plate 각도차이에 따른 적용범위
	중단구배에 따른 설치방법과 시공방법
	타 형식 교량에 대한 적용성 검토
유지보수 관련	추후 유지보수에 따른 대책 방안 연구
	과재하중에 대한 장기거동 분석
경제성 분석	기존 방법과의 경제성 비교
	시공방법에 따른 Case 별 경제성 분석

제 4 장 목표달성도 및 관련분야의 기여도

1. 목표달성도

가. 연도별 연구목표

1차년도에서 “변단면 PC-빔의 연속화 방안의 관한 연구”의 연구과제를 통해 국내 · 외 많은 사례들을 조사하여 미적효과를 극대화 시키면서 경제적이면서도 합리적인 연속화 방안에 관한 이론적 연구성과를 도출하였으며, 실제 설계반영과 함께 실 시공현장에 적용하였다.

2차년도에는 설계반영이 확정되어 시공 예정인 실 교량 재하시험을 하고자 한다. 이러한 실 교량 재하시험을 통해 실 시공교량에 대한 이론 값 대비 실 거동을 계측 데이터에 근거하여 비교 검증하여 구조적 안정성을 입증하고, 연속지점부 받침의 합리적인 방안과 실험에 의한 현장 적용성을 입증하는 것을 목표로 하고 있다.

연 차	연구 목 표	주요 연구내용
1차년도	▪ 변단면 PC-빔의 연속화 방안에 대한 이론적 연구	▪ 기존 연속화 방법에 대한 비교 분석 ▪ 국내 · 외 연속화 사례에 대한 연구
	▪ 합리적인 모델을 통한 시작품 제작	▪ 시작품 제작을 통한 이론적 연구 구현 ▪ 실시공 현장에 연속화 방안 적용
2차년도	▪ 이론적 연구를 근거로 한 실험적 연구	▪ 연속지점부 빔 연결의 합리적인 방법에 대한 실험적 연구 ▪ 경제성 제고를 감안한 시공방법 도출
	▪ 실교량 연속화 계측 및 장기거동 계측	▪ 연속교 실험체 제작을 통한 시험분석 ▪ 실교량 계측을 통한 준공교량 실험

나. 성과목표 및 성과지표

본 과제는 크게 두 가지 세부과제를 진행하여 이론적 연구와 실험에 의한 현장 계측 연구로 검증하는 순으로 진행하여 연속화 방안을 도출하는 것으로 그 결과가 사업적으로 활용될 수 있도록 연구를 최적화하는데 목표를 두고 있으며 수립한 성과지표는 예상되는 결과를 정량적으로 평가할 지표이다.

성과목표	성과지표		측정방법	목표치	가중치 (0~1)	성과물 명칭
연속화 방안연구	1	학술지게제 논문건수	학술지 게제조사	1건	0.1	세부과제에 따른 1건의 논문
	2	연구개발 홍보건수	미디어를 통한 홍보건수 조사	1건	0.1	미디어 홍보 1건
	3	특허출원건수	특허출원서류 조사	1건	0.1	1건의 특허출원
	4	연구원당 특허출원건수	특허출원서류 조사	0.25건/인	0.1	4명당 1건의 특허출원
	5	연구비당 특허출원건수	특허출원서류 조사	2건/5억	0.1	5억당 2건의 특허출원
	6	기술료 수입액	제무제표 조사	5억	0.1	과제비용 상당의 기술료 수입
	7	시제품 출시건수	One Shoe 모형제작	2건	0.1	PC-빔 사업화를 위한 통합모델
	8	사업화/ 제품화건수	시공횟수	10건	0.1	2011년 이후 시공실적
	9	신제품 매출액	개발기술 적용매출	20억	0.2	2011년 이후 시공실적

다. 연구목표 달성도

성과목표	성과지표		측정방법	목표치	가중치 (0~1)	성과물 명칭
연속화 방안연구	1	학술지게재 논문건수	학술지 게제조사	1건	0.1	대한토목학회 논문투고
	2	연구개발 홍보건수	미디어를 통한 홍보건수 조사	1건	0.1	-
	3	특허출원건수	특허출원서류 조사	1건	0.1	특허출원 (10-2010-0033146)
	4	연구원당 특허출원건수	특허출원서류 조사	0.25건/인	0.1	특허출원 (10-2010-0033146)
	5	연구비당 특허출원건수	특허출원서류 조사	2건/5억	0.1	특허출원 (10-2010-0033146)
	6	기술료 수입액	제무제표 조사	5억	0.1	-
	7	시제품 출시건수	One Shoe 모형제작	2건	0.1	One Shoe 모 형 One Shoe 시험체
	8	사업화/ 제품화건수	시공횟수	10건	0.1	2010년 현재 9건
	9	신제품 매출액	개발기술 적용매출	20억	0.2	2010년 현재 5,168(백만원)

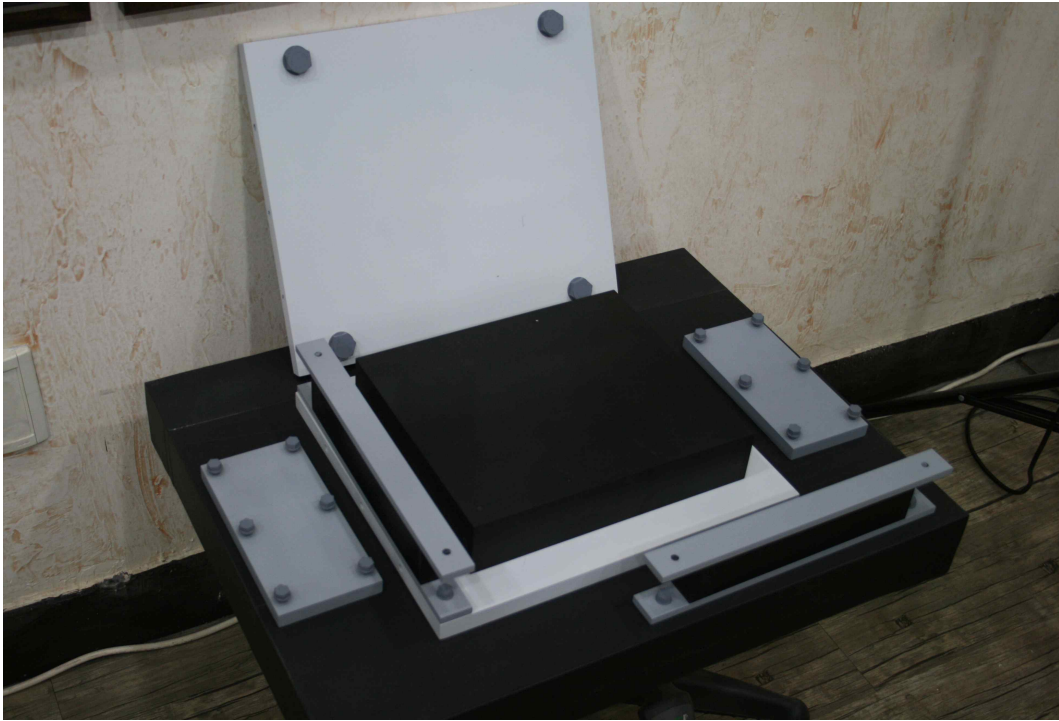
관인생략
출원번호통지서

출원일자 2010.04.12
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(7342)
출원번호 10-2010-0033146 (접수번호 1-1-2010-0230145-22)
출원인명칭 아이컨엔지니어링(주)(1-2007-036369-0) 외 2명
대리인성명 특허법인주원(9-2008-100161-7)
발명자성명 송영봉 전해관 송현섭
발명의명칭 교량받침 및 교량의 시공방법

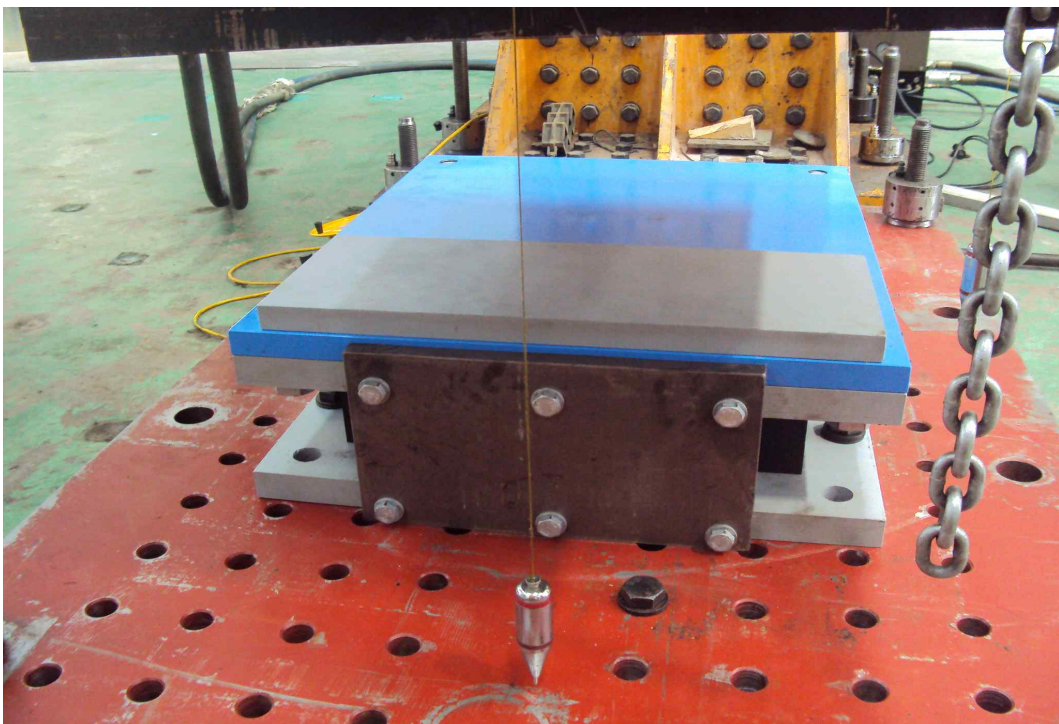
특 허 청 장

1. 출원번호통지서 출원 이후 심사진행 상황 등을 확인하실 때에는 출원번호가 필요하오니 출원번호통지서는 출원절차가 종료될 때까지 보관하시기 바랍니다.
2. 2-가. 특허 및 실용신안 출원은 심사청구 후 평균 16개월에 1차 심사처리가 이루어지고, 상표 및 디자인은 출원 후 평균 10개월에 1차 심사처리가 이루어집니다.
2-나. 특허 및 실용신안은 특허청 홈페이지(<http://www.patent.go.kr>)의 "고객지원서비스-민원처리과정통지 서비스" 코너에서 1차 심사결과통지 예고서비스를 신청하시면, 1차 심사처리 약 1개월 전에 해당 출원 건의 1차 심사결과통지 예정시기를 SMS 또는 E-mail 서비스로 제공 받을 수 있습니다.
2-다. 상표 및 디자인은 특허청 홈페이지(공지사항)에 유별 1차 심사결과통지 예정시기를 매월 게시하고 있으며, 특허정보검색서비스 시스템(<http://www.kipris.or.kr>)을 통해 개별 출원건에 대한 1차 심사결과통지 예정시기를 알려드립니다. 또한, 출원시 1차 심사결과통지 예정시기 알림 서비스를 신청하시면, SMS 또는 E-mail 서비스로 제공해 드립니다.
※ 상기 1차 심사결과통지 예정시기는 사정에 의해 다소 늦거나 빨라 질 수 있습니다.
2-라. 1차 심사결과통지시(심사관이 특허결정의 통보를 송달하기 전 또는 심사관이 최초로 거절이유를 통지한 후 출원인이 그 거절이유를 받기 전 중 빠른 때)까지 귀하께서는 특허출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 명세서 또는 도면을 보정할 수 있습니다.
특허출원은 출원일로부터 5년 이내에 특허법시행규칙 별지 제24호서식에 의거 심사청구를 하지 않으면 그 출원은 출원취하된 것으로 간주하여 처리됨을 알려드립니다.
3. 우선심사 특허(실용신안등록)출원 또는 디자인등록출원, 상표등록출원에 대해 조기에 심사를 원하시면 "우선심사제도"를 이용하실 수 있습니다.
4. 주소 등 변경신고 출원인의 주소 등을 변경하고자 하는 경우에는 특허법 시행규칙 별지 제4호의 2서식에 의한 출원인 정보변경(경정) 신고서를 제출하여야 합니다.
5. 산업재산권 표시, 광고요령 특허 등 산업재산권을 출원 중에 있는 경우에는 해당 산업재산이 출원상태임을 다음과 같이 표시하여야 하며, 이를 위반할 경우 특허법 제224조 및 제227조에 의거 처벌 받게 됩니다.
예) 특허출원 10-2001-0000001, 실용신안등록출원 20-2001-0000001, 디자인등록출원 30-2001-0000001, 상표등록출원 40-2001-0000001
6. 미성년자 미성년자인 출원인이 만20세에 도달하는 경우 출원인의 부모 등 법정대리인의 대리권은 소멸하게 되므로, 출원인은 직접 또는 대리인을 새로이 선임하여 특허에 관한 절차를 밟을 수 있습니다.
7. 문의처 기타 문의사항이 있으시면 특허고객상담센터(1544-8080)에 문의하시거나 특허청 홈페이지(www.patent.go.kr)를 참고하시기 바랍니다.
8. 특허청 주소 302-701 대전광역시 서구 선사로 139 정부대전청사 4동
특허청 서울사무소 주소 135-911 서울특별시 강남구 역삼동 647-9 한국지식센터
FAX) 대전 : 042-472-7140, 서울 : 02-566-8454

[특허출원 10-2010-0033146]



[One Shoe 모형 시작품 제작]



[One Shoe 시험체 2TYPE 제작]

※ 연구과제 기간 2009. 12. 8 ~ 2010. 8.7 기간 중 해당하는 변단면 PC-빔 연속교 관련
매출액은 7개 현장 ₩4,458,960,000 원

공 사 명	교 량 명	교 량 제 원	발 주 처	계약금액	계약일자
대전-당진간 고속도로 1공구 건설공사	산곡천교	1@25=25M	한국도로공사	64,000,000	2009. 08. 20
양평 스파월드 진입도로 건설공사	더류지엄교	3@40=120M	더류지엄 (양평군)	390,000,000	2009. 09. 16
본덕-임곡간 도로개설공사	봉흥 2교	2@30=60M	광주광역시	346,000,000	2009. 12. 22
고풍교 우회도로 건설공사	용 장 교	7@43=301M	충청남도청	840,000,000	2009. 12. 17
냉정-부산산 고속도로 5공구 건설공사	주 동 교	5@35=175M	한국도로공사	1,015,000,000	2010. 03. 29
낙동강살리기 32공구	공 도 교	3@45.4=136.2M	부산지방 국토관리청	282,000,000	2010. 04. 22
낙동강살리기 20공구	합 천 보	5@43+2@35=28 5M	부산지방 국토관리청	762,960,000	2010. 05. 20
어천제 축제공사	월 통 교	2@42=84M	원주지방 국토관리청	200,000,000	2010. 06. 01
진주-마산간 고속도로 6공구 건설공사	도 항 교	3@40=120M	한국도로공사	1,013,000,000	2010. 07. 26

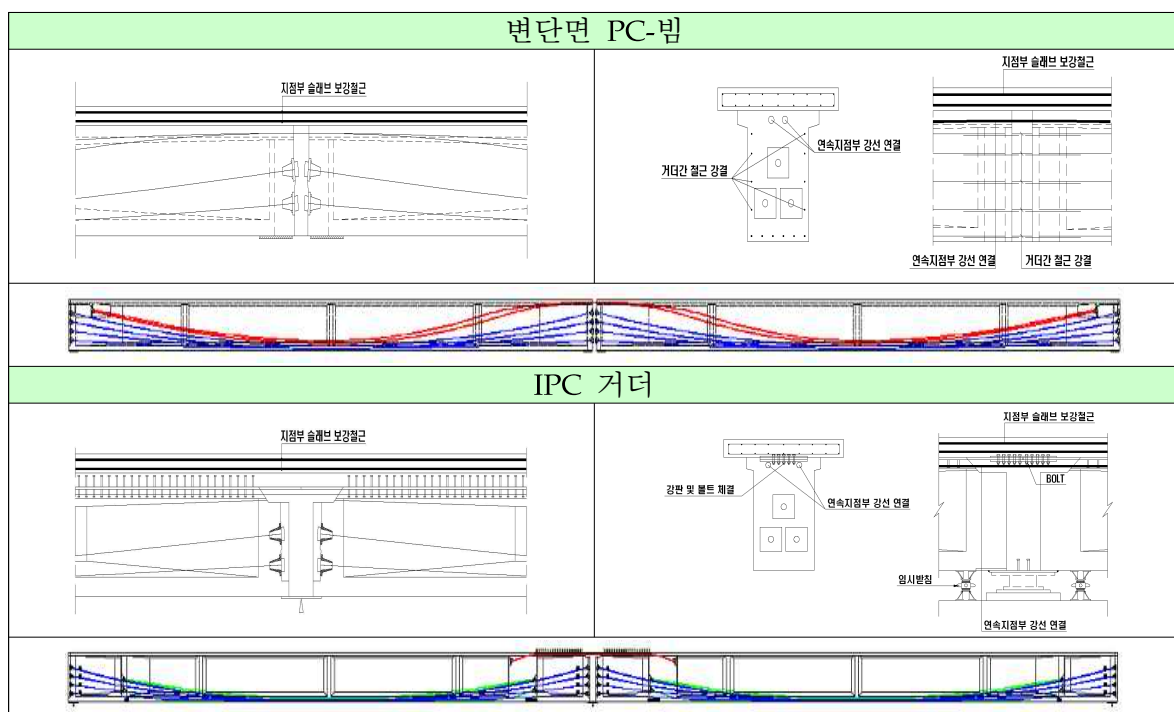
[변단면 PC-빔 연속교 시공계약현황]

2. 관련분야에의 기여도

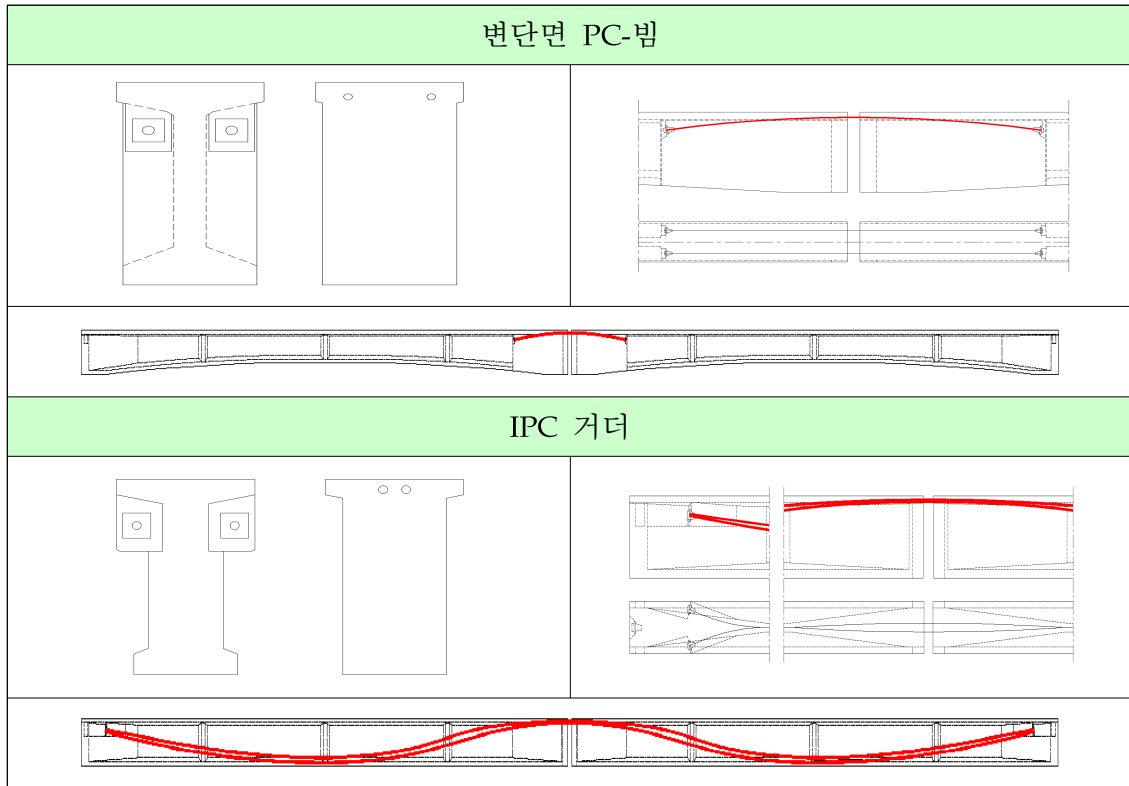
가. 타 공법과의 비교

변단면 PC-빔 연속화는 지점부 바닥판 슬래브를 연속화 시키는 것은 물론, 빔과 빔을 철근으로 강결시키면서 연속 지점부 인근을 강선 연결하여 긴장시켜 소정의 압축력을 도입시켜 빔과 바닥판이 합성된 후에 작용하는 추가 고정하중과 활하중에 의해 발생하는 연속지점부 부모멘트 구간에, 연속지점부의 부분 강선에 의한 긴장력 도입을 통해 효과적으로 발생하는 부모멘트를 감소시켜 바닥판 철근이 부담하는 인장력을 최소화 함으로써 철근량의 감소를 유도할 수 있어 구조적 안전성을 확보함과 동시에 경제적인 효과를 얻을 수 있다.

반면, 타 공법의 경우 연속화 하는 방법에 있어서는 큰 차이가 없으나, 사용재료에 비해 긴장력을 효율을 제대로 활용하지 못하는 부분과 시공시 재료분리에 의한 품질저하가 우려되는 단점을 노출하고 있다.



본 연구과제의 핵심인 변단면 PC-빔의 연속화 방법에 있어서 타 공법과의 차이점은 연속지점부 부분 강선에 의한 긴장력 도입을 통해 효과적인 차별화에 있다. 다음은 타 형식 연속교에 있어서 효율적인 재료의 사용과 효율적인 긴장력 관리에 따른 슬래브 보강 철근량 감소의 유도까지 요약한 것이다.



구 분	변단면 PC-빔	IPC 거더
긴장재 수	2공(7가닥용)	2공(7가닥용)
강 선 량	82kg	611kg
초기 긴장력(Pj)	2,516kN	2,516kN
즉시 손실 후 잔류 긴장력(Pi)	2,299kN	1,887kN
연속지점부 슬래브 소요 보강 철근량(As)	As(req) : 7,463 mm ² As(used) : 11,978 mm ²	As(req) : 10,505 mm ² As(used) : 17,032 mm ²

[타 공법과의 연속지점부 도입 긴장력 비교 검토]

상기 표에서 처럼 합성후 하중에 의해 발생하는 부모멘트 구간에 연결강선을 배치하고, 이를 통한 긴장력 도입으로 손실을 최소화하여 효율적인 긴장력 도입에 의한 발생응력을 감소시키는 합리적인 구조로 경제적인 설계가 가능하다.

구 분	변단면 PC-빔	IPC GIRDER	E-BEAM
형 고	2.3m	1.9m	1.7m
단면2차모멘트(I)	1,038,790,457,350mm ⁴	552,267,413,642mm ⁴	537,907,642,834mm ⁴
탄성계수(E)	30,600 MPa	29,300 MPa	29,300 MPa
EI	3.179 E+16	1.618 E+16	1.5761 E+16

[타 공법과의 연속지점부 강성 비교]

또한, 유사 PC-빔 공법과 달리 연속지점부의 형고가 높은 단면 특성상 연속지점부 단면 강성이 높아 연속화에 매우 유리한 구조적 장점이 있다.

나. 관련분야에의 기여도

1960년대 말 국내에 도입된 이후 간편한 설계, 시공성과 경제성을 바탕으로 사용되던 PC-빔은 수 십년 동안 현재까지 이렇다 할 기술의 발전 없이 표준화 되어 계속 사용되어지고 있다. 이러한 표준화는 기술자들로 하여금 추가개발의 의지를 약화시키고 관용화 되어 설계기술의 발전에도 악영향을 미친 것이 사실이다. 2000년대에 들어서는 고강도 콘크리트의 보급과 외국 사례들을 토대로 도로교에 있어서는 30~35m, 철도교에서는 20~25m에서 주로 사용되던 일반 PC-빔들이 단면에 변화를 주어 긴장력 도입효과와 경간장을 증대시키는 노력을 하고 있다.

그러나, 이러한 특허공법들도 일반 PC-빔 처럼 획일적이면서도 경직된 직선형상의 투박한 외관을 가짐으로서 최근 들어 요구되는 교량건설의 경관성이나 미관과는 거리를 두고 있는 현실이다.

변단면 PC-빔은 기존의 강박스 거더나 PSC BOX 구조물에서 구현되는 곡선형상의 미를 구현함으로써 경제적이면서도, 시공성과 더불어 미관까지 고려할 수 있는 새로운 교량 시장의 차별화로 시장에 적용되고 있다.

지난 10년간 국내기술로 발전을 거듭한 것이 형고 저감 및 경간장 증대를 위한 노력이었다면 앞으로는 미관을 중시하는 사회적 요구와 주변환경과 조화되는 아름다운 교량 건설을 위한 노력으로 이어질 것이며, 그 시작은 변단면 PC-빔에서 비롯될 것이다.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구개발결과의 활용방안

본 연구개발은 교량 상부 구조형식 가운데 대표적인 PC-빔의 제작기술과 관련되는 것으로서, 준공교량에 계측을 통하여 구조적 안정성을 입증하고, 실 시공을 통한 실용화에 그 목적이 있다.

변단면 PC-빔을 구성하는 핵심기술인 중앙부와 단부(연속지점부)의 적정 형고를 결정하기 위한 매개변수 연구로 PC-빔 내부에 설치되는 쉬스관 등 시공성을 감안한 적정 형고의 결정과 함께 인장응력이 발생하지 않는 최적의 단면으로 형고를 결정하는 연구를 통해 이미 기술적 차별성과 경제적 우위성을 확인하였다. 상기 연구결과를 바탕으로, 미관 향상을 위하여 형고에 변화를 줌으로써 강성 저하 방지를 위하여 최적의 단면 구성과 함께 필요구간 강재사용에 대한 연구를 내용으로 하여 강재 보강 정도에 따른 강성증대 효과와 적정 강재보강 구간의 검토 등은 이미 특허 출원으로 미래 원천기술을 확보하고 있다.

아울러 빔 연결의 합리적인 연속화와 2shoe에서 1shoe로의 시공방법을 통해 PC-빔 교량에 발생하고 있는 바닥판 횡균열 문제를 해결하고, 합리적인 연속화 방안은 기존 공법들과의 기술적 차별성과 경제적 우위성을 확인할 수 있는 좋은 계기를 마련할 것이다.

이에 연구과제를 통한 성과물에 대해 시장확대 뿐만 아니라, 판로개척 전략과 원가절감 방안에 따라 시장 점유율 또한 확대가 가능할 것으로 예상하고 있다.

구 분	세부 추진과제	비 고
홍보 및 영업활동 강화로 인한 판로 개척	- 설계용역사를 통한 적극적인 홍보, 영업활동 - 시공업체에 대한 기술 영업 강화 - 발주처별 맞춤영업과 지방 협력사 활동 강화	T/K 및 대안 등 민간투자사업 대상 시공회사 및 설계사 등에 대한 기술영업의 지속적 추진
현장 지원업무를 통한 원가 절감	- 현장에 대한 기술지원의 지속적 시행 - 발주처, 감리, 시공사에 대한 지속적 협의 시행으로 매출증대 및 공기지연 최소화로 원가절감에 기여	시공시 발생하는 문제점에 대한 기술적 검토와 시공사 및 비상주 감리와 의 원만한 관계 유지



[판로개척 및 마케팅 전략]

2. 연구개발결과의 기대효과

가. 기술적 측면

본 기술(제품)은 이러한 사회적 요구에 부응하여 PC-빔의 시공, 경제적 장점에 더하여 수려한 미관으로 차별화를 극대화한 기술로서 종래 PC-빔 시장뿐만이 아니라 유사 거더 건설시장에 까지도 그 파급효과가 매우 큰 기술로서 그 전망이 긍정적일 것으로 예상된다. PC-빔은 그 동안 수 많은 설계 및 시공 경험상 충분히 검증되어 일반화 된 교량 상부 구조 형식이다. 그러나, 그 동안 문제점으로 인식되던 PC-빔의 경간장 제약과 미관상 불량한 단점을 극복하여 개량된 기술로서 단순교 뿐만 아니라 연속교로서도 PC-빔의 시장 범위를 보다 넓게 하고자 개발된 기술이다.

이를 위하여 본 기술은 PC-빔을 구성하는 단면을 합리화 시키면서, 빔의 구조적 기능을 향상시킬 수 있도록 최소한의 적절한 강재를 이용함으로써 강성을 향상시키고, 고강도 콘크리트를 사용함으로써 경간장을 보다 늘리도록 하여 종래 PC-빔의 활용범위를 폭 넓게 함으로써 그 시장성을 키울 수 있다. 여기에 종래 PC-빔에서 문제로 인식되던 미관상 불량한 단점을 근본적으로 해결하여 일찍이 PC-빔에서 볼 수 없었던 미관상 장점을 더한 기술적 차별화로 기대된다.

나. 사회·경제적 측면

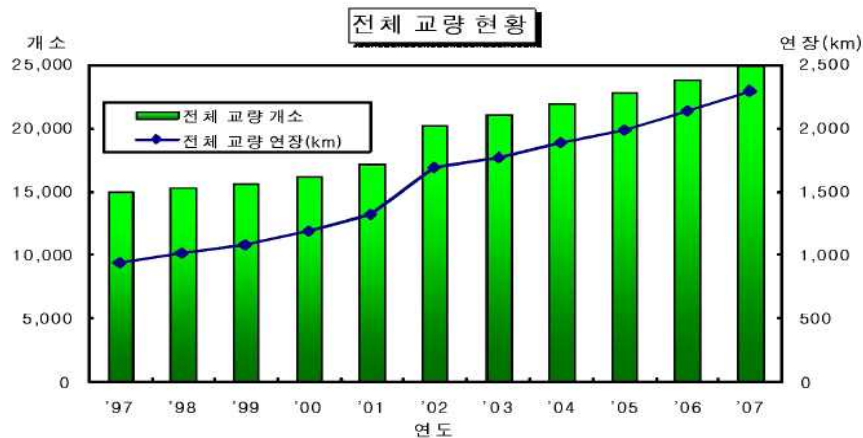
본 기술은 교량 건설시장의 발전에 국한된 것이 아니라 관련 산업의 발전을 함께 기대 할 수 있는 시장을 가지고 있다. 즉, 본 기술을 구성하는 재료 중 하나인 콘크리트는 국내 상당한 시장규모를 가지는 산업으로서 본 기술의 폭넓은 현장 적용에 따라서 관련 산업의 발전에 상당부분 기여할 수 있는 사회적, 경제적 파급효과를 가지고 있다.

한편, 국토해양부의 교량 현황조서에 따르면 총 교량수가 24,923개소, 연장이 2,289km

로 조사되어 2006년 대비 교량수 1,118개, 연장 150km가 증가한 것으로 나타났으며, 10년 전인 1997년 대비해서는 교량수 9,984개소, 연장 1,356km가 증가하여 연평균 교량 수는 6.68%, 연장은 14.5% 꾸준히 증가한 것을 알 수 있다.

기준년도	교량 개소		연 장(m)
'97년 12월말	14,939		932,479
'06년 12월말	23,805		2,139,127
'07년 12월말	24,923		2,289,088
비율 ('07.12월말 기준)	'97년 대비	증가수	9,984개소
		연간비율	6.68%(연평균)
	'06년 대비	증가수	1,118개소
		비 율	4.7%

[연도별 교량수 및 연장 증가 추이]



[연도별 전체 교량 현황]

관련 산업은 경기 변동보다는 건설시장의 특성상 정부의 SOC투자 정책에 의해 시장의 규모와 성장이 좌우되나 매년 비슷한 수준의 물량이 발주됨으로써, 시장의 전체 규모와 성장 속도는 매우 안정화 되어 있다.

최근 들어 정부의 원가절감 정책으로 최저가 입찰이 일반화 되면서 공사원가를 절감하는 기술의 약진 또한 예상되며 국내·외 전반에 대한 시장 및 산업동향은 다음과 같다.

(1) 국내시장 동향

(가) 시장규모

(단위 : 억원)

구 분	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
PC-빔	2,693	1,703	2,079	1,983	2,003
강박스	10,616	6,678	9,947	8,715	8,802
PSC박스	2,141	491	2,723	1,480	1,495
프리플렉스	718	516	379	512	517
기타	4,273	2,902	3,121	1,764	1,782
계	20,441	12,290	18,249	14,454	14,599

주 산업의 특성상 매년 시장규모가 편차가 있으나, 국내 거더시장은 1조 4천억원 내외의 안정적인 물량으로 시장 형성되어 있다.

① 지난 5년간 건설시장이 약1%의 성장을 해옴

☞ SOC 투자 규모 축소로 건설시장이 성장세 둔화

② 금년 7월, 향후 10년간 수백조원 규모의 대형 SOC 18건 추진 확정

③ 금년 7월, 정부 4대 초광역권 개발 방향을 담은 지역발전정책 확정

④ 정부의 정부원가 절감정책으로 건설시장 기존 최저가입찰 확산으로 건설업계 압박

⑤ 대형 SOC투자 등 경기활성화정책에 힘입어 향후 5년간 연 5%이상의 성장세 예상

⑥ 정부 국토환경 디자인 혁신사업 적극 추진

⑦ 광역 경제권 30대 선도 프로젝트 발표

(나) 주요 수요처

① 중앙정부 : 도로공사, 토지공사, 철도 등을 통해서 발주.

② 지방정부 및 지자체 : 지방도를 중심으로 지자체에서 발주.

③ 민간발주처 : 골프장, 민간산업단지 등에서 극소량 발주.

광역경제권 30대 선도프로젝트

1. 제2외곽순환도로(인천-파주-양평-오산-인천)
2. 원시-소사-대곡 복선전철
3. 인천지하철 2호선
4. 행정중심복합도시(광역교통시설, 정주기반 등)
5. 대전-행정도시-오송- 신교통수단
6. 물류 고속도로(제2경부, 제2서해안)
7. 서해선 복선전철(화양-원시)
8. 동서4축고속도로(음성-충주, 충주-제천)
9. 새만금개발새만금 개발, 신항 건설, 군산공항 확장)
10. 여수 EXPO(막람회장, 주변 기반시설)
11. 서남해안 연육교(압해-압대, 화양-적금)
12. 호남고속철도
13. 광주외곽순환도로
14. 경전선 복선전철(부산-마산, 진주-광양)
15. 동서8축 고속도로(함양-울산)
16. 동북아제2허브공항
17. 마산-거제 연육교
18. 부산외곽순환고속도로
19. 동서5축 간선도로(영주-울진간 국도 36호선)
20. 동서6축 고속도로(상주-영덕)
21. 남북7축 고속도로(울산-포항-영덕)
22. 3대 문화권 문화 생태 관광 기반조성
23. 대구외곽순환도로
24. 동서2축 고속도로(춘천-양양)
25. 남북7축 고속도로(동해-삼척, 주문진-속초)
26. 원주-강릉 철도
27. 제2영동 고속도로(경기파주-원주)
28. 서귀포 크루즈항
29. 제주해양과학관
30. 영어교육도시

[광역 경제권 30대 선도 프로젝트]

(2) 국외시장 동향

(가) 시장 규모

(단위 : 조원)

구 분	2004년	2005년	2006년	2007년	2008년
교량시장	40.4	42.4	44.5	46.7	49.0
거더시장	16.2	17.0	17.8	18.7	19.6

① 지난 5년간 해외건설시장은 약5%의 성장, 향후 5년간 성장세 유지 전망.

☞ 서남아시아, 동남아시아, 아프리카 등을 중심으로 건설투자액 증가.

② 국제 원유가와 해외 건설경기가 동반 상승세 경향으로 향후 해외건설시장의 상승세 유지 전망.

③ 아시아, 중동, 아프리카의 국가를 중심으로 6%이상의 성장 예상.

④ 전세계 건설시장 규모는 4조 5천억불 이상으로 추산되며, Global Insight 자료에 의하면 해외 건설시장규모는 약 5천억불에 이를 것으로 전망.

⑤ 아시아권이 향후 5년간 전 세계 건설시장의 50%를 점유가 전망되며 이들 국가의 성장이 세계 건설시장을 좌우할 것으로 예상.

도로나 항만 등 세계 사회간접시설 시장 전망을 살펴보면 2011년까지 석유나 가스 혹은 지하광물 등을 보유한 국가들이 개도국이나 선진국들에 비해 투자하는 비중이 클 것이라는 전망이다. 사회간접시설 건설시장은 일본을 제외한 아시아권, 동유럽 및 중동, 아프리카에서 증가되고 있는 토목시장에 주목할 필요가 있다.

3. 변단면 PC-빔의 활용실적

가. 고속도로 적용현황

구 분	과 업 명	교 량 명	교 량 현 황	발 주 처	시공사 /설계사	비 고
1	대전-당진 1공구	산곡천교	1@25=25m	한국도로공사	용마	완 공
2	남해고속도로 냉정-부산간 5공구	주 동 교	5@35=175m	한국도로공사	KCC 건설 (다린이엔씨)	제 작 중
3		김해JCT 3교	2@30=60m			
4		김해JCT 4교	2@30=60m			
5	상주-영덕간 고속도로 1공구	구잠 3교	1@35=35m	한국도로공사	대한건설탄트	실시설계 완료
6	상주-영덕간 고속도로 12공구	청송 IC교	1@30=30m	한국도로공사	건화	실시설계 완료
7	상주-영덕간 고속도로 2공구	서의성 IC교	1@35=35m	한국도로공사	다산건설탄트	실시설계 완료
8		정안 1교	1@35=35m			
9		정안 2교	1@40=40m			
10	상주-영덕간 고속도로 6공구	북의성IC교	5@45+3@40 =345m	한국도로공사	천일	실시설계 완료
11	88고속도로 10공구 (담양-성산간)	대평교	1@40=40m	한국도로공사	이산	실시설계 완료
12		정장육교	1@35=35m			
13		정장천교	1@45=45m			
14		황간천교	6@45=270m			
15	부산외곽고속도로 1공구	진영나들목교	1@30=30m	한국도로공사	수성	실시설계 완료
16	부산외곽고속도로 3공구	광재2교	5@45=225m	한국도로공사	평화	실시설계 완료
17		광재3교	1@35=35m			
18		Ram-A1 교	5@45=225			
19	부산외곽고속도로 7공구	금 정 교	1@30=30m	한국도로공사	신성	실시설계 완료
20		금정나들목교	1@40=40m			
21	부산외곽고속도로 8공구	철마나들목 4교	3@40=120m	한국도로공사	이산	실시설계 완료
22	진주-마산 6공구	도 항 교	3@40=120m	한국도로공사	제일ENG	제 작 중

나. 국도, 지방도, 민자도로 적용현황

구 분	과 업 명	교 량 명	교 량 현 황	발 주 처	시공사 /설계사	비 고
1	은평새길 민자투자산업	불광 1교	30+40+30=100m	서울특별시	GS건설 (동호)	기본설계 완료
2	고풍교 우회도로중 용장교 설계변경	용장교	7@43=301m	충청남도 건설사업소	경호	제작 완료
3	함평1지구 하천환경정비공사	가금교	3@30=90m	익산지방 국토관리청	고려건설턴트	실시설계 완료
4		금산 1교	2@30=60m			
5	봉평-덕거간 도로건설공사	봉평 1교	3@35=105m	강원도청	이산	실시설계 완료
6		봉평 2교	2@40=80m			
7	회천택지개발사업	마전1새마을 교	2@21=42m	양주시	대륜	실시설계 완료
8		임어교	1@32=32m			
9	삼장-산청간 국도 기본설계	금서교	2@40=80m	부산청	삼안	기본설계 완료
10		평촌교	2@25=50m			
11	본덕-임곡간 도로개설공사	봉흥 2교	2@30=60m	광주광역시	극동건설	제작완료
12	양평 스파월드 진입도로	스파월드 진입교	3@40=120m	더뮤지엄 (양평군)	동아측량기술	완 공
13	한강수계(홍천1지역) 치수사업 실시설계	신 대 교	2@30=60m	원주지방 국토관리청	삼안	실시설계 완료
14	낙동강살리기 20공구	합 천 보	5@43+2@35 =285m	부산청	SK건설 (동호)	시공완료
15	낙동강살리기 32공구	공 도 교	3@45.4=136.2m	부산청	두산건설 (KCM)	시공완료
16	옥과천 하도정비사업	옥과천교	3@31=63m	곡성군	TN산업	실시설계 완료
17	곡성군 부산물 비료공장 진입도로	진입교량	1@26=26m	곡성군	신오ENG	실시설계 완료
18	포항시 관내 국도대체우회도로	유 강 교	6@40=240m	부산지방 국토관리청	도화	실시설계 완료
19	괴시재해위험지구 정비사업	괴 시 교	5@36=180m	영덕군	진양	실시설계 완료
20	어천제 축제공사	월 통 교	2@42=84m	원주청	효성	시공완료

구 분	과 업 명	교 량 명	교 량 현 황	발 주 처	시공사 /설계사	비 고
21	비봉-매송간 민자도로	백학 3교	1@50=50m	엠코 (화성시)	동명기술공단	기본설계 완료
22		원평교	1@40=40m			
23		원평 2교	1@40=40m			
24		쌍학교	5@50=250m			
25	고흥-남계지구 택지개발사업	녹지교	2@20=40m	고흥군	우빈	실시설계 완료
26		남계2교	2@20=40m			
27	양양-남대천수계 재해예방사업 실시설계	범 부 교	6@35=210m	원주지방 국토관리청	이산	실시설계 완료
28		미천 휴양림교	2@40=80m			
29	서산-부석간 지방도 확포장공사	부 석 교	1@30=30m	충청남도 건설사업소	드림이엔지	실시설계 완료
30	영산강강변도로(4공구) 개설공사	신 흥 교	46+3@34+46 =194m	전라남도청	한국기술	실시설계 완료
31	판대2교 재가설공사	판대2교	2@31.7=63.4m	원주시	효성 엔지니어링	실시설계 완료
32	원주혁신도시개발사업	입춘내천5교	1@37.2=37.2m	원주시	중호 엔지니어링	실시설계 완료
33		입춘내천6교	1@45=45m			
34	다인-비안2 국도건설공사	용남교	1@30=30m	부산지방 국토관리청	내경 엔지니어링	실시설계 완료
35	옥과무창교재가설공사	무창교	3@40=120m	곡성군	TN산업	실시설계 완료
36	신천좌안도로건설공사	신천좌안교	27@45=1,215m	대구광역시	동성 엔지니어링	실시설계 완료
37	어천-공주간 지방도 확포장공사	오 동 교	1@40=40m	충청남도 건설사업소	다우컨설팅	실시설계 완료
38	진접-내촌간 도로건설공사(1공구)	진별 IC교	2@35=70m	서울지방 국토관리청	수정 엔지니어링	실시설계 완료
39	진접-내촌간 도로건설공사(2공구)	엄현교	1@35=35m 1@45=45m	서울지방 국토관리청	한국해외기술 공사	실시설계 완료
40	갈평지구 저수지 독높이기사업	2호교량	1@45=45m	농어촌공사	농어촌공사	실시설계 완료
41	능금-학선마을간 연결도로 확장공사	능 길 교	2@26=52m	진안군	예일 엔지니어링	실시설계 완료
42	거진지구 농업용 저수지 독높이기 사업	거진 1교	2@45=90m	농어촌공사	도우 엔지니어즈	실시설계 완료
43	진위역-오산시계 도로개설공사	하 북 교	3@32+5@48 +3@32+48=480m	경기도 건설본부	경원 엔지니어링	실시설계 완료
44	하이패스 전용나들목 설치공사	모 촌 교	1@40=40m	한국도로공사	다산컨설팅	실시설계 완료

※ 기타 터키 및 민자사업, 진행 중인 실시설계 건은 제외함.

다. 시공사진



[대전-당진간 1공구, 산곡천교 1@25=25m]



[양평스파월드 진입교량, 더 뮤지엄교 3@40=120m]



[낙동강 32공구, 공도교 3@45.4=136.2m]



[낙동강 20공구, 합천보 5@43+2@35=285m]



[어천제축조공사, 월통교 2@42=84m]



[진주-마산 6공구, 도항교 3@40=120m]



[본덕-임곡간 도로개설공사, 봉흥2교 2@30=60m]



[고풍교우회도로 건설공사, 용장교 7@43=301m]

제 6 장 참 고 문 헌

1. 도로교 설계기준 (한국도로교통협회, 2005)
2. 도로교 설계기준 해설편 (대한토목학회, 2008)
3. 콘크리트 구조설계기준 (한국콘크리트 학회, 2007)
4. 도로설계요령 (한국도로공사) 등
5. 신현묵, 프리스트레스트 콘크리트(동명사, 2005)
6. 김수만, 철근콘크리트 구조공학(2005, 청문각)
7. PSC 빔교의 연속화 방안에 대한 연구(한국도로공사, 1999)
8. E.C.Hambly, "Bridge Deck Behaviour"
9. Arthur H. Nilson, "Design of concrete structures"
10. R. I. Gilbert, "Design of Prestressed Concrete".
11. Edward G. Nawy, "Prestressed Concrete"
12. Bridge design Practice manual, state of cal dep of transportation.
13. Conrad P. Heins, "Design of Modern Concrete Highway Bridge"
14. Ceistian Menn, "Prestressed Concretre Bridge"
15. AASHTO, "LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS"
16. Michael P Collins and Denis Mitchell, "Prestressed Concrete Structures"