# 제 3 장 콘크리트교

## 3.1 콘크리트 재료

### 3.1.1 시멘트

(1) 시멘트의 기원

오늘날 시멘트라고 하면 1820년경 영국에서 발명한 포틀랜드 시멘트로서 그 역사는 200년도 채 되지 않으나, 넓은 의미의 시멘트는 무기질 교착재나 결합재를 의미하므로 석회와 석고를 혼합해서 쌓아올린 피라미드나 석회와 화산재를 혼합해서 만든 그리스 로마 시대의 수경성 시멘트를 포함한다면 인류의 시멘트 역사는 기원전 수천년으로 거슬러 올라간다.

오늘날 남아 있는 유적들로 미루어 석회 모르터의 기원은 석회석의 산지인 소아시아나 그리스로 추정된다. 기원전 2500년경 건설된 고대 이집트 쿠퍼왕의 피라밋은 외장 석재 표면에 모르터가 도포되었는데 지금도 이 구조물의 상부에 그대로 잔존해 있다.

현재의 포틀랜드 시멘트의 출발점이 된 것은 수경성 시멘트의 발견이라고 할 수 있다. 1756년 영국에서 에디스톤 등대를 건설할 때 존 스미톤은 점토분을 다소 함유하고 있는 석회석을 소성하면 수경성을 갖는다는 사실을 발견하였다.

그로부터 40년 뒤인 1796년 영국의 제임스 파커는 점토질 석회를 높은 온도에서 구워 클링커로 만들고, 이를 분쇄하여 시멘트를 제조하는 방법을 발명하였다. 이 점토질 석회석을 원료로 한 천연 시멘트는 색깔이 이탈리아산 포졸란(pozzolan)과 비슷하여 로만(Roman)시멘트라 부르게 되었다. 이 시멘트는 수중 도장용으로 수요가 증가했는데, 1825년에 완공된 테임즈강 터널공사 및 국회 의사당 재건공사에 쓰여져 더욱 유명해졌다.

1824년에 이르러 영국 리드시의 벽돌공인 Joseph Aspdin(1779~1855)이 오늘날의 시멘트와 거의 같은 새로운 인공시멘트의 제조법을 영국 특허국에 등록하게 되었다. 이 제조법은 석회석을 구워서 생석회를 만들고, 이것에 물을 가하여 미분말의 소석회로 만든 다음, 여기에 점토를 혼합하여 다시 석회로에서 800℃까지 소성하여 클링커를 생산한 후 미분쇄하여 제조하는 것이었다. 아스프딘이 특허를 받은 후에도 20여년 간 연구가 거듭되어 비로소 오늘날 쓰이고 있는 것과 같은 포틀랜드 시멘트가 탄생하게 되었다. 포틀랜드 시멘트라는 명칭은 경화한 시멘트의 색깔과 경화현상 등이 당시 건축재료로 사용되던 포틀랜드산 천연석과 유사하다는 점에서 유래된 것이다. 그 후 영국·프랑스·독일·미국 등에 포틀랜드 시멘트 공장이 건설되어 토목건축에 대대적으로 사용하면서 세계는 포틀랜드 시멘트를 산업 기반화하여 오늘날에 이르게 되었다.

(2) 시멘트기술의 도입과 발전과정

1) 시멘트 기술의 도입

정확한 기록은 없지만 경인철도의 건설과 함께 철도교량의 교각과 기초에 무근콘크리트를 사용한 것이 콘크리트의 시작이라고 할 수 있다. 그 후 1910년경부터 국도가 신설되면서 철근콘크리트 슬래브교, T형교가 전국에 건설되면서 철근콘크리트가 본격적으로 사용되기 시작하였고, 그 당시에 건설된 교량이 아직도 사용되고 있는 것들이 있다. 현존하는 것 중 가장 오래된 것으로는 전라남도 나주시 영강동에 위치한 안영교(연장 9.0m), 안창교(연장 9.0m)와 전라남도 나주시 금강동에 위치한 구진교(연장 9.8m), 금성교(연장 20m)가 있으며 모두 철근콘크리트 슬래브교 형식이다.

2) 일제시대의 시멘트 제조

우리나라에서 처음으로 시멘트 공장이 건설된 시기는 기미독립운동이 일어난 해인 1919년 12월이었다. 이에 앞선 1914년 7월에 발발한 제1차 세계대전으로 이른바 전쟁경기를 맞게 되자, 일본 최대의 시멘트 회사인 오노다(小野田)시멘트는 만주 및 중국시장에의 진

출을 목표로 평양 교외의 평남 강동부 승호리 경의선 연변에 우리나라 최초로 시멘트 공장을 건설했다. 킬른 1기로 구성된 이 공장은 연산 6만톤의 생산능력을 갖추고 있었다.

이 공장은 1921년 2월 연산 14만톤으로 확장되었으며 1928년 2월에는 다시 22만톤으로 증설되었다. 이어 1936년 1월 3차 증설을 통해 연산 30만톤에 이르렀다. 또한, 오노다 시멘트는 1928년 2월 한반도 내에서의 사업 확대와 대륙진출을 위해 함남 문천에 13만톤의 생산공장을 신설하였다. 그 후 문천 천내리 공장은 킬른 1기를 증설하여 생산능력을 배가시켰다.

1936년 2월 우베(宇部) 시멘트사 계열의 조선 시멘트 주식회사가 황해도 해주에 킬른 4기, 연산 36만톤의 공장을 신설하였고, 그 해 6월에는 조선 오노다 시멘트(주)가 함북 부영군 고무산에 킬른 2기, 연산 34만톤의 공장을 준공하였다. 역시 그 해 6월에 아사노(淺 野) 시멘트(주)가 조선 아사노 시멘트(주)를 설립하여 1937년 11월에 사리원 근처인 황해도 봉산군 마동에 킬른 2기, 연산 18만톤 규모의 공장을 건설하였다. 그리하여 우리나라는 기존의 생산능력 43만톤이 일시에 88만톤의 시설 증대가 이루어짐으로써 총 131만톤의 생산능력을 갖추게 되었다.

한편 남한 지역에서는 조선 오노다 시멘트(주)가 삼척지역에 공장 건설을 추진하여 1937년 3월 착공 1942년 7월에 준공하였다. 그러나 이 공장은 기능을 제대로 발휘하지는 못하였다. 준공 첫 해인 1942년에는 8만 5,850톤, 1944년에는 1만 6,845톤, 해방되던 해인 1945년에는 9,063톤으로 생산량이 감소하여 북한 지역의 시멘트가 그때 우리나라 수요를 충족시켰다.

3) 광복 전후의 시멘트 생산

1944년 우리나라의 시멘트 생산은 100만톤을 초과하여 100만 3,307톤의 생산을 기록하였으며, 소비 또한 76만 6,000톤으로 높은 실적을 보여주었다. 1945년 8월 일본의 패망과 함께 광복을 맞이하였으나 뒤이은 남북분단으로 산업구조는 파행적 구조를 면치 못하게 되었다. 시멘트 산업도 우리나라 총생산능력 170만톤 중 오직 8만 4,000톤의 삼척공장만이 남한에 남게 되었다. 그나마 남한 유일의 삼척공장도 설비의 고장, 기능공 부족, 연료 및 에너지 문제로 광복 이전부터 가동이 거의 중단된 상태였다. 그러나 삼척공장은 해방 후 일본인 기업주가 물러가자 공장에 남아 있던 한국인 종업원들이 힘을 합쳐 공장을 보수하고 가동에 들어갔으나, 6·25 동란으로 시멘트 생산은 전면 중단되고 말았다.

1953년 삼척시멘트 공장은 UNKRA(국제연합한국재건단)의 자금 63만 1,500달러의 지원으로 보수를 단행하여 가동이 재개되었다. 그리하여 삼척 시멘트는 연간 4만~5만톤의 생산을 할 수 있었다. 그러나 이 공장이 본격적인 보수와 시설확장을 꾀하여 국내의 시멘트 조달에 일익을 담당하게 된 것은 1956년 12월 동양시멘트 주식회사로 전환된 이후부터였다.

동란 후 전후복구로 인해 국내 시멘트 수요는 날로 증가하여 당시의 삼척공장만으로는 그 수요를 충당할 수 없었다. 따라서 정부는 급증하는 수요에 대비하여 경북 문경에 새로운 시멘트 공장건설을 계획하게 되었다. 1954년 6월 2일 상공부와 UNKRA는 시멘트 공장 신설에 따른 장소, 자금계획 등에 완전 합의를 보고 신설공장의 상호를 대한양회공업주식회사라 정하고 1955년 11월 30일에 공장건설에 착공하여 1957년 9월 26일에 연산 24만톤의 시멘트 생산공장을 준공하였다.

1960년대에 접어들어 우리나라는 경제개발5개년계획의 실시로 시멘트 수요가 급격히 증대되었다. 따라서 기존의 동양시멘트, 대한양회의 생산량으로는 매년 증대되는 시멘트의 수요를 충당할 수 없게 되었다. 1960년대 말 국내 시멘트 생산량은 46만 4,265톤이었으나 수요량은 52만 2,085톤으로 수입을 하지 않을 수 없었다. 그리하여 시멘트의 수입 의존도는 1960년 11.1%에서 1963년에는 26.2%로 늘어났다. 정부에서도 이러한 사정을 감안, 경제개발계획의 추진과 함께 시멘트 공장의 신·증설을 적극적으로 검토하게 되었다.

4) 경제개발계획과 시멘트 생산

우리나라의 시멘트 공업은 1960년대의 경제개발정책에 힘입어 급성장 하였다. 시멘트는 철근 목재 등과 더불어 산업건설의 기초자재로서 1960년대 초부터 정부의 공업화 정책이 진행됨에 따라 철도, 발전시설, 항만, 하천, 교량, 수리시설 등 사회간접자본에 대한 투자

가 급진전되고 다수의 공장이 건설됨으로써 그 수요가 폭증하게 되었다.

이러한 시멘트 수요증가와 정부의 경제개발정책에 부응하여 기존의 동양시멘트와 대한양회는 생산시설의 확충을 꾀하는 한편 쌍용, 한일, 현대, 경원, 유니온시멘트 등이 새로이 시멘트업계에 진출하였다. 그리하여 1964년에 이르러서는 연산 40만톤의 쌍용, 한일시멘트와 연산 20만톤의 현대시멘트 3개 공장이 준공됨으로써 기존의 동양, 대한양회의 2개 공장(연산 72만톤)과 합하여 연간 총생산능력이 172만 톤에 이르게 되었다.

이때부터 우리나라 시멘트의 연간 생산실적이 100만톤을 넘어섰으며 공급이 수요를 초과하게 되었다. 이렇게 되자 정부와 업계는 시멘트의 수입을 중지하였고, 이로부터 소량이기는 하나 쌍용양회를 통해 한국산 시멘트가 해외로 수출되기 시작하였다.

1960년대부터 우리나라 시멘트 산업은 공장의 신·증설과 공정안정을 통하여 급성장했고 이와 같은 흐름이 지속되어 1970년대 후반에는 일대 도약기를 맞게 되었다. 이는 제2차 및 제3차 경제개발 5개년계획의 실시에 따라 기존 시멘트 공장의 대확장이 이루어졌다. 그 대표적인 예가 쌍용양회 동해 대단위공장의 건설과 뒤이은 560만톤 증설사업이었다.

이와 같이 지속적인 공업화 정책에 따라 정부는 사회간접자본의 확충을 위한 도로, 항만, 댐 건설 등에 주력하였다. 특히 1968년에 경부 고속도로가 착공되고 급속한 공업화에 의한 공장신설 및 신규 주택건설 등 각 부문에서 수요가 증대함에 따라 시멘트 생산시설 확충이 급진전되었다. 이러한 상황하에서 쌍용양회는 동해에 대단위 공장 건설을 추진하였고, 동양, 대한, 한일, 현대 등은 기존공장의 증설을 단행하였다.

제3차 경제개발 5개년 계획이 실시된 70년대 무렵에 들어와서는 고도의 경제성장과 본격적인 경기상승에 발맞추어 주택경기가 활성화되어 생산 설비 확충이 이루어졌다. 여기에 새마을운동의 전개에 따른 농어촌 환경개선 등으로 시멘트의 수요는 더욱 증대되어 업계는 일대 호황을 맞았다.

우리나라의 시멘트 생산이 연간 1,000만톤을 넘어선 것은 1975년이며, 제3차 경제개발이 끝나던 1978년의 생산량은 1,546만톤을 기록하였다. 이와 같이 국내 시멘트 산업의 급성장은 쌍용양회가 동해 대단위공장을 성공리에 완공한 결과였으며, 특기할 만한 것은 이 기간 중 각 사의 공장 가동률이 평균 90%를 상회하는 호조를 보였다는 점이다. 그러나 이처럼 급성장한 시멘트산업은 1979년부터 시작된 2차 석유파동에 의한 경제불황으로 국내수요 및 수출이 둔화됨에 따라 1980년과 1981년에는 생산과잉의 시련에 부딪혔다. 그 후 국내 경기가 다시 호전되기 시작했고 업계의 해외시장 진출의 다변화 노력으로 시멘트 산업은 다시 활기를 찾게 되었다. 그리하여 그 동안 검토 중이던 시멘트의 생산시설 확충 계획이 본격적으로 추진되어 1983년에는 국내 시멘트 연간 생산실적이 2,000만 톤을 돌파하게 되었다.

5) 1980년대 이후의 시멘트 산업

1980년대 초 제2차 석유파동의 여파로 우리 경제가 마이너스 성장을 기록하자 건설경기는 급속히 침체되었고, 그에 따라 시멘트 업계는 심한 불황에 빠져들었다. 그러나 1980년대 중반부터 이른바 3저의 혜택으로 경기가 회복되기 시작했고, 이후 서울 올림픽과 주택 200만호 건설, 사회간접자본 확충 등의 수요촉발 요인이 이어지면서 1990년부터는 연중 수급난이 계속되는 과열 분위기 속에서 시멘트 업계는 전례 없는 호황을 누리게 되었다.

지난 1980년대 중반기에서부터 1990년대 중반까지 시멘트 생산은 연평균 10% 내외의 성장률을 기록한 반면, 국내수요는 연평균 12~13%의 신장세를 보여 이 동안의 연평균 GDP 성장률 8~9%를 앞질렀다. 이에 따라 국내 시멘트 업체들의 킬른 가동률도 1982년 이래 80% 이상 수준을 유지하였고, 특히 1988년 이후에는 증설공사에 따른 일시적 가동 중단을 제외한다면 90% 이상의 높은 수준을 지속해왔다.

이 기간 중 시멘트 제조 회사들의 활발한 신·증설 노력으로 생산능력은 1981년 연산 2,350만톤, 1991년 4,200만톤, 1993년 5,028만톤, 1995년 5,599만톤, 98년 6,187만톤으로 급격히 증가했으나 급증하는 수요를 충당하지 못하여 1991년 708만톤, 1995년 208만톤, 1997년 299만톤의 시멘트를 해외에서 수입

해야만 했다.

특히 1991년에는 국내 수요가 당초 예상을 훨씬 뛰어넘는 4,541만톤을 기록함으로서 1인당 시멘트 소비량이 1톤을 초과하게 되었다. 국민 1인당 시멘트 소비량이 1톤을 소비하는 경우는 싱가포르와 같은 도시국가나 인구 과밀 소국인 아랍 에미레이트 등 특수한 경우를 제외한다면 세계적으로 유례를 찾기 힘든 폭발적 상황이었다. 이러한 높은 소비량은 1997년말까지 계속 이어져 1인당 소비량이 1.5톤에 이르러 세계 최고 소비국으로 자리 매김을 하고, 생산량으로는 중국, 미국, 러시아, 일본에 이어 세계 5위를 차지하기에 이르렀다. 이에 따라 정부는 과열된 건설경기를 진정시키기 위하여 1990년대 중반까지 상업용 건축물 건축허가 제한 및 착공 연기, 신도시 분양 연기 및 공기 연장 등 일련의 건설경기 진정대책을 발표하였다. 이 기간중 시멘트 부족량을 중국과 북한으로부터 수입하여 충당하였으나, 콘크리트 강도부족 파동을 겪기도 하였다.

한편 내수부문에서의 수급불균형이 심화되면서 1990년부터는 수출물량의 수입연계에 의한 정부의 수출규제 조치가 실행되었다. 이는 결국 계절적 요인에 의한 일시적 공급과잉물량 및 잉여물량 해소를 위한 완충장치로서 업계가 꾸준히 관리 유지해온 해외 수출선의 이탈로 이어져 장기적인 관점에서 해외시장 관리에 큰 부작용을 초래하였다.

1980년대에 해외공급기지를 확보한 쌍용양회의 경우, 1990년대 초에는 270개 일본 거래선 중 70% 이상이 이탈했고, 현지 합작선으로부터 파트너 관계청산 요구까지 받았으며, 미국에 설립한 현지 공급기지도 제3국에서 물량을 공급받아야 하기도 하였다.

이러한 건설경기의 호조로 시멘트 수요는 지속적으로 증가되어 우리나라 각 시멘트 제조 회사들은 향후의 공급과잉을 우려하면서도 정부측의 독려에 힘입어 과감한 신·증설 계획을 수립, 추진하여, 1990년에 4,000만톤, 1993년에 5,000만톤, 98년에는 6,000만톤을 초과하는 생산능력을 보유하게 되었다. 이러한 생산 설비는 최신의 고효율 소성 및 분쇄 설비로 생산성 또한 일대 혁신을 이루게 되었다.

1998년 IMF체제에 의해 우리나라의 건설경기의 위축으로 시멘트 수요가 4,450만톤으로 급격히 줄어 시멘트 수급면에서 시멘트의 공급과잉 현상이 심화되어 1980년 오일쇼크 이후로 시멘트 각 사가 조업단축을 하기에 이르렀다. 그러나 쌍용양회를 중심으로 각 사는 해외 시멘트 시장을 겨냥하여 수출에 노력을 기울여 1998년에 282만톤의 수출 실적을 올렸고, 1999년에는 500여만톤의 수출을 시도하였으나, 시멘트산업의 재무구조 악화로 2000년에는 외국의 시멘트기업이 국내기업에 출자형식으로 국내에 본격적으로 진출하기 시작했다.

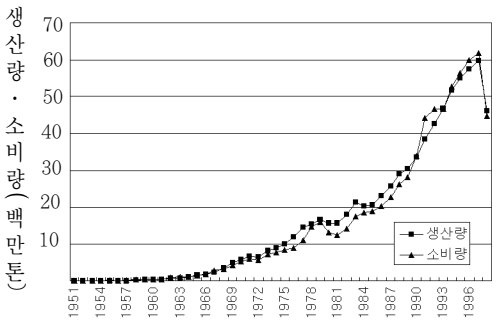

그림 3.1 국내 시멘트의 생산량과 소비량 변화

(3) 시멘트산업의 현황과 전망

산업이 발전되고 1997년 국내 건설시장이 완전히 개방됨에 따라 기능성 시멘트의 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 1종(보통 포틀랜드) 위주의 시멘트에서 중용열, 조강, 저열, 내황산염 특성의 포틀랜드 시멘트가 개발되어 상품화되어 구조물 건설시 용도에 맞는 시멘트를 선택하여 사용할 수 있어 고품질의 구조물이 건설되고 있다.

이러한 포틀랜드계 시멘트 이외에 산업의 발달과 빠르게 변화하는 사회체제에서 요구되는 특성과 기존 구조물의 신속한 보수 및 긴급공사, 공사기간의 단축 등의 요구에 대응하고자 여러 종류의 속경성 시멘트가 개발되었다.

이러한 용도 이외에 구조물에 부합되는 특성을 발현하는 특수 목적형 시멘트의 개발이 활발히 진행되어 일부는 상품화되고 있다. 특수 목적형 시멘트는 KS나 ASTM, JIS 등 주요 규격에는 없으나, 이미 건설자재로써 모든 성능이 검증된 포틀랜드 시멘트나 특수 시멘트를 주로 이용하여 원하는 특성을 발현하도록 개질(改

質)하거나 시멘트 광물을 변화시켜 특수 목적형 시멘트를 개발하여 사용하고 있다. 예를 들면, 이들 제품 중 저발열 시멘트인 벨라이트 시멘트는 포틀랜드계 시멘트로서 일본에서 1995년 개발되어 상품화된 후 1997년 4월 JIS화하여 저열시멘트로 규격화되었고, KS나 ASTM에서는 Ⅳ종으로 규정되어 있는 시멘트이다. 그러나 이 시멘트의 초유동, 저발열, 고강도 특성을 더욱 증진시키고 단점인 조기강도 저하 특성을 개선하여 조강화한 특수 목적형의 건축용 초유동 시멘트(건축용 벨라이트 시멘트)로 상품화되었다. 국내에서는 슬럼프 플로우 65+5cm, 2시간 경시 변화 5cm 이내의 콘크리트에 벨라이트 시멘트를 사용하여 인천 LNG 저장 탱크가 건설되었다.

향후에는 콘크리트 구조물에서 현재 보다 한층 다양화된 기능화 콘크리트가 요구될 것이며 시멘트 재료에서 이러한 고유특성이 발현될 것으로 보인다. 즉, 해양이나 지하와 같은 가혹한 조건에서 내구성 및 시공이 용이한 재료, 구조물 자체를 예술화하여 아름다운 경관을 고려한 광택 노출 콘크리트, 고내구성의 시멘트 매트릭스계 복합재료, 콘크리트 구조물의 장기 내구성을 위한 보수 보강 재료, 유해 중금속이나 방사선 폐기물의 안정화 처리를 위한 환경 정화용 시멘트 재료, 자기충진성(Self-levelling 및 compacting) 재료, 극한 환경 내구재료, 1,000년의 내구성을 갖는 초 수명재료 등 독특한 고유특성을 발휘하고 환경 친화적인 요구가 증대되어 새로운 개념의 시멘트 재료들이 개발되어 우리와 더욱 친숙한 재료로 다시 자리 매김을 할 것으로 기대된다.

### 3.1.2 골 재

(1) 골재생산과 건설산업

풍부한 하천골재를 사용하던 우리나라에서는 1980년대부터 건설물량 폭증으로 골재부족, 골재파동현상을 겪기 시작했다. 1990년대에 들어서 200만호 주택건설의 추진과 도로, 지하철, 항만, 공항 등 사회간접자본의 확충으로 건설투자가 큰 폭으로 증가하였다. 1985년 불변가격을 기준하여 실질건설투자액은 1988년에는 17조 6천억원 이었으나 1992년에는 29조원으로 1.6배 정도 증가하였다. 이는 연평균 12.9% 가량 증가한 것이다. 이러한 추세에 따라 1997년에는 총건설 물량이 103조원에 이르렀다가 1998년 IMF이후 2년간은 대폭 감소하였다.

건설활동의 증가는 건설자재의 수요를 크게 증가시키고 있다. 우선 골재의 수요는 1990년에 들어서 건설투자의 급증에 따라 크게 증가하였다. 1986년의 골재수요는 7천 253만㎥이었으나, 1992년에는 1억6천100만㎥로 2배 이상 신장하였다. 이에 대하여 골재의 허가공급량은 전체 수요의 60% 수준이며, 물량면에서 볼 때, 1986년 4천491만㎥이었고, 1992년에는 1억986㎥로 역시 2배 이상 신장하였다. 이러한 자료를 토대로 할 때 우리나라의 골재수요는 1990년대에 들어서 물량면에서 급신장하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 건설자재는 크게 공업생산물과 자연채취물로 구분된다. 공업생산물인 건설자재의 대표적인 예는 시멘트, 철근, 타일 등을 들 수 있으며, 자연채취물인 건설자재는 석재, 골재 등을 들 수 있다. 공장에서 생산되는 건설자재, 즉 공업생산물인 건설자재는 건설활동의 증가로 건설자재수요가 증가하면, 공장가동율을 높여 생산을 늘릴 수 있으며 따라서 공급이 늘어날 수 있다. 그러나 자연채취물인 건설자재, 특히 골재는 채취원이 확보되지 않으면 시설확충만으로 공급량을 증가시킬 수 없다는 문제점이 있다. 또한 골재 채취원이 확보되었다 하더라도 환경문제 등이 고려되어야 하기 때문에 기술적, 제도적 보완도 함께 이루어져야만 생산량을 증가시킬 수 있다. 따라서 이와 같이 골재는 자원개발차원에서 접근이 요구되는 부문이기도 하다.

뿐만 아니라 자연채취물은 대체재료를 개발하기도 어렵다. 대부분 공장에서 생산되는 건설자재는 대체성이 강하다. 그러나 골재는 아직은 뚜렷한 대체제를 찾기 어렵다. 그리고 골재생산은 지역성이 강하기 때문에 부족하다고 하여도 해외에서 수입하거나 타 지역에서 반입하기 어렵다. 특히 우리나라의 경우 주된 공급원인 하천골재의 고갈과 그에 따른 골재 채취원의 원거리화는 골재산업을 불안정하게 만들고 때로는 골재산업 존립자체를 위협하기도 한다.

골재산업의 불안정은 골재생산과 공급을 어렵게 만들며 이는 다시 골재가격의 불안정으로 이어지며 이는 다시 건설활동의 불안정으로 이어질 수 있다는 점에서 골재공급의 안정은 무엇보다 중요하다 하겠다.

한편 골재품종별 허가공급비중을 살펴보면 1986년의 경우 강골재 73%, 육상골재 1.2%, 쇄석골재 17.5%, 바다골재 8.3%로서, 이 때에는 하천골재의 공급이 주종을 이루었다. 그러나 1992년에는 강골재 43.3%, 육상골재 2.3%, 쇄석골재 40.4%, 바다골재 14.3%로서 제조골재의 비중이 크게 신장하였다. 또한 2000년에는 강골재 24.1%, 육상골재 8.8%, 쇄석골재 43.7%, 바다골재 23.4%로 예상하고 있는데, 이는 강골재의 비중이 더욱 줄어들고 바다골재의 사용이 급증하며 쇄석골재의 사용도 꾸준히 증가하는 추세이다.

최근 출하되고 있는 인공경량골재는 기존의 인공경량골재가 갖고 있는 단점을 크게 개선시킨 것들이다. 절건비중이 0.8로 종래의 경량골재에 비해서 상당히 가볍고 24시간 흡수율은 4%로 기존의 인공경량골재의 10~30%에 비해 매우 작기 때문에 골재가 수분을 흡수함으로써 발생할 수 있는 슬럼프손실, 펌프압송성의 저하 등에 큰 개선이 이루어졌다. 골재의 내부조직은 미세한 독립된 기공으로 형성되어 있고, 이것이 흡수율이 적어지는 원인이 된다. 이러한 골재를 사용한 콘크리트는 굳지 않은 상태에서는 골재의 비중이 작아서 골재분리가 일어나기 쉬우므로 시멘트 페이스트의 점성을 높여야 한다. 강도, 변형특성은 기존의 콘크리트에 비해서 인장, 전단강도가 낮게 나타나고 있으며, 탄성계수가 기존 콘크리트에 비해서 매우 작은 값을 나타내고 있으므로 섬유를 넣는 등 복합재료로서의 검토가 이루어지고 있고, 압축강도시험의 경우 고강도 콘크리트와 같이 취성파괴의 거동을 나타내고 있다. 내구성을 살펴보면, 내동해성의 경우 기존 인공경량골재를 사용한 경우보다 크게 향상되었으며 충분한 내동해성을 갖고 있다. 건조수축은 기존 경량골재 콘크리트의 경우 초기에는 작다가 장기적으로 가면 증가하는 특성을 갖고 있으며 새로운 인공 경량골재의 경우 보통 콘크리트와 기존 인공 경량골재의 중간에 위치한다. 구조부재로서의 사용은 탄성계수가 작기 때문에 탄성계수가 작은 아라미드섬유로 프리스트레스를 도입하여 사용한다. 탄성계수가 작은 것은 단점이기도 하지만 내진벽 등의 구조물에 사용하여 지진에너지를 흡수할 수 있으므로 주요 구조부를 보호할 수 있는 장점이 되기도 한다.

(2) 골재환경의 변화

국내에서는 1970년대까지만 하더라도 강모래, 강자갈이 골재공급의 주종을 이루었으나 1980년대 이후 하천골재가 점차 고갈되기 시작하여 쇄석골재, 육상골재, 바다골재 등의 사용량이 급격히 증가하고 있으며, 골재원이 점차 원거리화하는 경향을 보이고 있다.

골재자원은 유한한 자원으로서 앞으로도 부존량의 지속적 감소와 더불어 대체골재의 사용이 불가피할 것으로 전망되므로 특별한 대책이 없는 한 골재의 원활한 공급 및 품질확보는 금후의 큰 과제로 남아있다.

1980년대 이후 골재수급의 문제점은 크게 다음과 같이 여섯 가지 항목으로 정리할 수 있다.

① 천연골재의 공급량이 감소됨에 따라 제조골재의 사용량이 점차 증가되고 있다. 대표적인 예로 석산개발에 의한 쇄석골재의 이용량이 크게 증가하게 되었는데, 굵은 골재 부문에서 쇄석골재의 이용량은 1992년 자료를 토대로 할 때, 굵은 골재 소비량의 85% 내외를 점유하게 되었다.

② 미 이용 자원이었던 바다모래의 사용량이 급격히 증가되고 있다. 바다모래자원은 1980년대 초반에는 큰 관심을 받지 못하였으나 1980년대 중반이후 하천골재자원의 점진적 고갈에 따라 해안지방을 중심으로 사용량이 크게 증가되어 왔는데, 현재 인천, 제주, 부산, 목포, 서산 등 해안지방에서는 바다모래의 사용이 보편화되었으며, 점차 내륙으로 파급되어 가고 있는 상태이다.

③ 골재자원의 원거리화가 가속화되고 있다. 건설활동량의 급증으로 그 동안 대도시의 골재공급을 담당했던 대도시 인근의 골재원이 대부분 개발이 불가능하게 되어 골재 채취원이 점차 원거리화되었으며, 현재에는 골재 부존량이 풍부한 타 시, 도에서의 반입이 급증하고 있는 현실이다. 이에 따라 골재의 운반비용이 급증하고 있으며, 골재의 수송여건도 점차 악화되고 있는 상태이다.

④ 골재의 수급구조에 일대 변동이 일어나고 있다.

종래에는 골재가 주로 건설현장에 직접 투입되었으나 1980년대 이후 레미콘산업이 골재의 주요 수요처로 등장하였는데, 골재 소비량 중 레미콘용으로 사용된 비율은 1992년의 경우 총 골재소비량의 약 55%를 점유하고 있다.

⑤ 골재의 품질이 점점 저하되고 있다. 이는 하천골재자원의 감소에 따라 대체골재의 이용량이 증가되면서 나타난 현상인데, 쇄석골재의 알칼리골재반응에 의한 균열, 바다모래의 염분에 의한 철근의 부식, 육지골재의 토성분 함유에 의한 경화불량, 산골재의 풍화에 따른 강도부족 등이 대두되고 있으며, 골재의 공급여건이 약화됨에 따라 화강토와 같은 불량골재를 사용한 예가 적발되기도 하였다.

⑥ 골재수송환경이 악화되고 있다. 1980년대 이후 심화된 도심지 및 간선도로의 교통체증, 그리고 골재과적차량에 대한 단속강화로 인하여 골재의 수송환경은 매우 열악해졌다.

### 3.1.3 혼화재료

콘크리트용 혼화재료는 넓은 의미로 좋은 콘크리트를 만들기 위하여, 좁은 의미로는 콘크리트의 제 성질을 개선하고, 콘크리트에 특정 성질을 부여하고, 콘크리트의 강도를 증대시키고 단위시멘트량과 단위수량을 감소시키기 위하여 사용된다. 혼화재료는 시멘트량에 비하여 비교적 다량으로 사용되는 재료를 혼화재, 비교적 소량으로 사용되는 재료를 혼화제로 구분한다. 혼화재에는 고로슬래그미분말, 플라이애쉬, 실리카흄, 천연포졸란, 팽창제, 착색제 등이 있고, 혼화제에는 AE제, 감수제, AE 감수제, 고성능 AE 감수제, 고유동화제, 응결 및 경화촉진제, 수축조정제, 수중불분리제, 방수제, 발포제 등이 있다.

혼화재 중 천연 포졸란은 고대 로마시대부터 사용되었고, 외국에서는 고로슬래그 미분말과 착색제가 1920년 이후부터 현재까지 사용되고 있으며, 1950년 이후부터는 이 외에도 플라이애쉬, 실리카흄, 팽창제가 사용되고 있다. 그러나 국내에서는 1980년대 말부터 타설 콘크리트의 온도를 낮추기 위해 무연탄 화력발전소의 부산물인 플라이애쉬가 매스 콘크리트, 지하철 박스구조, 상하수도 수조 구조 등에 사용되기 시작했으며, 사용량은 점차 증가하는 추세에 있다. 한편 포항 및 광양제철소의 부산물인 고로슬래그미분말은 1990년 초부터 시멘트 생산용 혼합재료로 사용하기 시작했으나 콘크리트에는 본격적으로 사용되지 않고 있는 실정이다. 선진국에 비하여 강도 600kgf/㎠이상의 고강도 콘크리트를 거의 사용하고 있지 않은 국내에서는 고강도 콘크리트의 제조에 사용되는 실리카흄의 사용은 매우 미진한 실정이나, 고강도 추세에 맞추어 향후 그 사용이 증가될 전망이다.

콘크리트의 성질, 품질, 시공에 가장 크게 기여한 재료는 바로 혼화제이고, 현재는 혼화제가 없는 콘크리트를 생각할 수 없을 정도로 발전되었다. 혼화제는 1938년 미국에서 콘크리트의 내구성문제를 해결하기 위하여 개발된 AE제로부터 시작된 것이다. 전 세계적으로는 세계 2차대전 후인 1950년 초부터 AE제, 감수제, AE 감수제가 사용되기 시작하면서 레미콘과 펌프크리트에 의한 시공이 가능해졌고, 1980년대부터는 고유동화제의 개발로 유동화 콘크리트, 다짐이 필요없는 콘크리트, 고성능 콘크리트의 사용이 가능해졌다. 국내에서는 1967년에 건설부 국립 건설연구소의 「콘크리트 혼화재료」책자를 통하여 AE제 등 각종 혼화재료가 소개되었으나 거의 사용되고 있지 않다가, 1984년에 KS F 2560-84(콘크리트용 화학혼화제)의 산업규격이 제정되면서 본격적으로 혼화제의 사용이 급속도로 확산되었고, 1980년대에는 혼화제의 잘못된 사용으로 사회 문제를 일으킨 경우도 있었지만 현재는 그 사용량이 증가일로에 있다. 1980년대 초까지만 해도 6~10cm 정도의 슬럼프값을 사용하였으나, 이후 현재에 이르러서는 슬럼프 12~15cm의 레미콘과 펌프카를 사용하는 콘크리트시대가 온 것이다.

향후에는 고강도(600~1000kgf/㎠) 및 초고강도(1000kgf/㎠이상)콘크리트의 사용이 활발해지면서 고성능 AE 감수제, 실리카흄, 경질 골재를 이용하는 새로운 콘크리트시대로 변모할 것이고, 이 이외에도 고내구성 및 고인성 콘크리트, 다짐이 필요 없는 콘크리트, 경량고강도 콘크리트, 수중콘크리트, 한중콘크리트를

제조하기 위한 새로운 개념의 혼화재료가 계속 개발될 전망이다.

### 3.1.4 배합설계

다양한 성능과 요구조건을 만족시키는 콘크리트를 만들기 위하여는 사용재료의 적절한 선택과 배합비율 즉 콘크리트의 배합설계가 매우 중요하다. 1950년대 말까지는 시멘트, 잔골재, 굵은골재의 배합비율로 오랜 경험으로부터 얻어진 1:2:4, 1:3:6의 용적배합비가 사용되었고, 그 당시 1:2:4의 비율은 보통콘트리트 구조물에, 1:3:6의 비율은 기초공과 매스콘크리트 등과 같이 강도가 그다지 중요시되지 않는 콘크리트에 사용되었고, 국내에서도 1960년대 중반까지 널리 사용되었다. 그러나 현재는 콘크리트 1㎥을 만드는데 필요한 각 재료의 사용량을 표 3.1과 같이 중량으로 표시하고, 물-시멘트비, 잔골재율, 단위수량, 공기량, 굵은 골재의 최대치수 등 까지도 포함한 콘크리트 시방배합표 및 현장배합표가 널리 사용되고 있다.

콘크리트의 배합설계는 콘크리트 1㎥를 구성하는 시멘트, 잔골재, 굵은 골재, 물, 혼화재료, 미세기포(갇힌 공기와 AE공기)의 단위량을 구하는 것이지만, 실제로는 시멘트, 잔골재, 굵은 골재, 물의 양을 결정하는 문제이므로 한 개를 제외한 3개의 독립변수를 갖는 3자유도 문제로 된다. 이런 문제를 고려하는 배합설계 이론에는 1918년 Abrams가 발표한 물시멘트비이론, 1920~1940년 사이에 Fuller, Weymouth, Feret, Anderberg, Furnas 등에 의해 발표된 것으로서 골재의 입도이론을 고려한 골재의 최밀충전입도이론(最密充塡粒度理論), Edwards, Young, Kennedy, Lyse, Talbot 등에 의해 제안된 워커빌러티를 고려한 배합비이론, 간이배합설계법, 시험배치방법(trial batch), 물시멘트비이론을 보완한 ACI와 PCA배합설계방법 등이 배합설계의 이론적 기반이 되었다.

국내에서는 1964년 건설부 건설연구소가 기술지도서 「콘크리트의 배합설계」를 통하여 보통 콘크리트의 배합설계법, 간이배합설계법, AE콘크리트의 배합설계방법을 소개하면서 국내의 배합설계방법을 1:2:4와 1:3:6의 재래방법에서 물시멘트비 이론을 근간으로하는 시험배치방법으로 변환하게 되었고, 현재까지도 그 틀을 유지하고 있는 실정이다.

그러나 국가경제개발계획에 따른 대규모 사회기반시설과 아파트의 건설로 콘크리트의 사용량이 급증하면서 1965년~1976년 사이에 국내에 소개되고 1980년 초부터 전국적으로 사용이 확대되기 시작한 레미콘은 콘크리트 기술의 혁신을 가져왔다. 이 시기부터 주로 인력과 믹서에 의해 만들어 지던 콘크리트는 골재의 저장 및 선별시설, 재료의 자동계량장치 등을 갖춘 콘크리트 배치플랜트, 레미콘 운반차, 콘크리트 펌프 등의 기계화, 자동화 기술에 의해 전보다 과학적이고 체계적으로 대량생산되기 시작했다. 그러나 건설경기의 바람을 타고 콘크리트의 수요가 공급을 추월하기 시작하면서 레미콘 품귀현상 문제로 콘크리트 분야는 새로운 문제점과 환경에 부딪치게 되며 사회기반 시설의 확장, 86아시안게임과 88올림픽경기를 위한 각종 시설물의 건설, 아파트 200만 호의 단기간 건설, 분당, 일산, 평촌, 산본, 중동 등의 신도시 건설 등에 의한 과열 건축경기 등의 여파로 1980년대부터 1990년대 중반까지의 사이에 레미콘 물타기, 교통체증으로 인한 운반시간 문제, 잔골재 부족으로 인한 해사의 사용 등으로 콘크리트의 품질과 내구성 문제가 심각한 사회문제로 대두되기도 하였으나 현재는 많은 관련자들의 노력으로 많은 문제

표 3.1 콘크리트 배합표

| 배합강도 | 굵은골재 최대치수 | 슬럼프의 범위 | 공기량의 범위 | 물-시멘트비 (W/C) | 잔골재율 (s/a) | 단 위 량(kg/㎥) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 물 W | 시멘트 C | 잔골재량 S | 굵은골재량 G | | 혼화재료 | |
| | | | | | | | | | ㎜ ~ ㎜ | ㎜ ~ ㎜ | 혼화재 | 혼화제 |
| kg/㎠ | mm | cm | % | % | % | kg | kg | kg | kg | kg | kg | kg |

점이 감소되었다.

그러나 아직도 모든 콘크리트공사가 자동화시설을 갖춘 배치플랜트에서 생산된 레미콘에 의해 수행되고 있지만, 고강도 콘크리트시대의 문턱에 있는 현 시점에서 볼 때 더 좋은 콘크리트를 만들기 위하여는 시멘트와 골재의 품질, 콘크리트 품질관리의 개선과 노력이 절실하다. 특히 향후에는 초고강도 콘크리트, 고성능 콘크리트, 고내구성 콘크리트를 생산 활용하기 위한 새로운 개념의 배합설계기법과 품질관리기법도 개발되어야 할 것이다.

### 3.1.5 레미콘

(1) 레미콘의 출현

독일의 Harald Steibicher 박사에 의하면, 세계에서 최초로 레미콘이 탄생한 것은 1903년 독일의 스타른베르크(Starnberg)에서 건설업자 Magens에 의해 레미콘 플랜트가 건설되어, 레미콘 제조의 특허를 받은 시기라고 서술하고 있다.

그러나, 독일에서는 약 50년간 레미콘 산업은 성장하지를 못하였다. 제1차 세계대전과 그 후의 세계적인 경제불황, 그리고 미숙한 기술 때문에 기업으로 성립하지 못했던 것으로 추정되며 독일에서의 레미콘 산업의 부활은 제2차 세계대전 종료 후의 1954년부터였다.

한편, 미국에서는 독일보다 늦은 1913년, 메릴랜드주의 볼티모어시에 최초의 레미콘 플랜트가 건설되었다. 당초에는 센트럴 믹스(central mix) 방식으로, 플랜트에서 반죽되어, 덤프트럭으로 운반되었기 때문에 품질불량으로 평판이 나빴고, 10년간은 거의 사용자로부터 인식되지 못하였다. 그 후 1926년에 이르러 트럭믹서의 발명으로 품질문제가 해결됨에 따라 급속한 발전을 보기에 이르렀다.

미국에서는 창업 당시부터 골재업자가 골재판매의 일환으로 소규모 기업의 형태로 시작된 것이 많으며, 공급지역이 광대하였기 때문에 거의가 트럭믹서 방식이 채택되었다. 그 후 대기업의 참여에 의해 대도시에서는 센트럴 믹스 방식도 나타나게 되었다. 1950년에는 전미 1,320개 도시에 1,700개의 플랜트가 건설되었으며, 연간 생산량은 3,800만 ㎥에 달하게 되었다.

(2) 레미콘 제조기술의 도입

레미콘산업의 도입기는 제2차 경제개발 5개년계획 기간이었다. 1960년대의 근대화 추진과정에서 사회간접자본의 확충과 기간산업의 조성으로 건설사업이 활발히 진행되면서 건설자재의 하나인 레미콘의 필요성이 대두되기 시작하였다.

자립경제의 기반구축이란 목표아래 막을 내린 제1차 경제개발에 이어 산업구조의 근대화와 자립경제의 확립을 근간으로 하는 제2차 경제개발(1967~1971년)이 시작되면서 공업 고도화의 기반조성과 인천, 울산을 위시한 항만건설, 도시 토목사업 및 다목적댐 건설, 공업단지 조성 등의 건설이 전국적으로 확산되었으며, 공사의 규모 확대에 따르는 시멘트의 수요증가는 레미콘의 수요를 필연적으로 창출하게 되었다.

국내 레미콘업계의 선두주자인 쌍용양회공업(주)는 1965년 서빙고공장의 설립을 시작으로 1969년 4월 당시로서는 최신 레미콘 제조시설인 P.C.S.(punch card system)방식 배치 플랜트 1기(90㎥/hr, 연생산능력 180천 ㎥)와 레미콘트럭 90대(용량 3.5㎥)를 보유한 원효로공장을 신설하였다. 또한 제3차 경제개발 5개년 계획의 기본전략인 사회간접자본의 전향적 확대와 시멘트유통시설의 시책에 힘입어 1973년에는 성수동공장, 부산(동래)공장, 구미공장, 1974년에는 포항공장, 1975년에는 대구공장의 설립 및 증설이 이루어졌다.

(3) 레미콘산업의 중흥

경제개발 제1,2,3차 계획으로 자립적 경제구조 기반구축에 성공한 정부는 자력성장구조 실현을 위한 제4차 경제개발계획을 추진하였는데, 산업구조개편 고도화, 새마을사업 확대, 과학기술 투자의 확대 등을 개발전략으로 한 기술·고용집약적 공업개발에 주력하였다. 이러한 배경아래 국내의 건설경기의 활성화가 가속화되면서 시멘트 및 레미콘의 수요는 급속한 증가를 가져왔다.

건설경기의 활황 이외에도 레미콘산업의 급속한 성장배경에는 대도시 건설현장내에 콘크리트생산장비의 설치 및 시멘트, 골재등 원자재의 저장이 어려울 뿐만 아니라 생산장비 투자비용이 과다 지출되기 때문에 항시 주문하여 쉽게 구입해 쓸 수 있고, 원가를 절감할

수 있는 레미콘을 선호하게 되었다.

레미콘은 1970년대까지만 하더라도 크게 알려져 있지 않았고 제품의 품질에 대한 신뢰의 부족으로 수요가 크지 못 하였으나 1980년대에 들어 혼합, 계량, 운반기기의 현저한 발달에 따라 수요자들의 레미콘에 대한 인식이 크게 향상되면서 종래의 현장생산 콘크리트에서 레미콘으로의 전환이 급격히 확산되었다. 특히, 1979년 내수 콘크리트의 레미콘 전화율이 최초로 두 자리수를 기록하면서 서서히 도입기에서 성장기로 넘어서게 되었으며, 1983년에는 총 수요가 1천만 ㎥를 돌파하면서 본격적인 성장을 예고하였다. 이 시기에 매년 20여개 공장이 신설되어 생산능력은 연평균 41.0%, 총 수요는 년평균 37.4% 증가하면서 지속적으로 수요대비 공급의 우위현상을 보였다.

1980년대를 넘어서면서 레미콘산업은 과점기를 지나 경쟁이 치열한 완전 경쟁시대로 돌입하였다. 특히 정부의 중소기업 육성책에 따른 중소기업의 시장참여는 괄목할 만한 것으로서 대기업 중심의 레미콘시장구조가 중소기업으로 확산되어 갔다.

그러나 1985년~1987년은 레미콘산업의 시련기라고 할 수 있는데, 판매가격의 20~30%의 할인판매 및 6개월 이상 어음거래 등 최악의 영업상황을 맞이하기도 하였으나, 곧이어 닥쳐온 올림픽 특수로 인한 건설경기 활황으로 1990~1992년에는 유례없는 호황기를 맞았으며, 이 기간의 신설 공장수는 1989년까지의 기존 공장 수에 육박할 정도로 늘어나면서 레미콘산업의 고도 성장기를 이루었다.

1990년대에는 연생산능력이 1억 ㎥ 규모로 성장하여 한때는 경우 매출 규모가 4조원의 시장으로 확대되어 시멘트시장의 1.5배 수준으로 건축자재 가운데 최상위의 비중을 차지하게 되었다. 그러나 1990년대 초반의 큰 폭의 성장이후 1992년 말에 들어서는 건설경기 과열에 대한 정부의 억제책으로 레미콘산업 성장률이 두 자리수에서 한자리수로 둔화 추세를 보이면서 고도 성장기를 지나 성숙기에 접어들었다.

1994년에는 레미콘의 한계수요로 예상했던 1억 ㎥도 돌파함으로써 향후 큰 폭 성장보다는 안정적인 성장을 이루는 듯 하였으나 다른 건자재와 마찬가지로 IMF

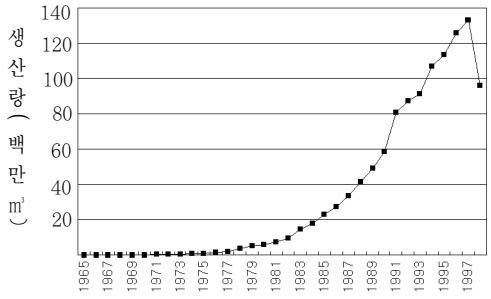


그림 3.2 국내 레미콘의 생산량 변화

이후 1998년 급격한 생산량 감소로 1994년 생산량 이하로 감소했으며 1999년에는 1998년 생산량과 비슷한 수준에 겨우 머물렀다.

서해안개발의 본격화, 7개 광역권 개발, 고속전철 등 대형 프로젝트의 사회간접자본의 지속적인 확충, 재개발·재건축 등 꾸준한 주택사업의 전개 등의 긍정적인 요소와 함께 미분양 아파트의 확산 및 금융·부동산 실명제로 인한 건설경기위축 등 부정적인 요소가 병존하는 가운데, 1994년부터 시작된 건설시장개방, 성수대교 붕괴사고로 인한 부실시공에 대한 정부의 강력한 방지책 등으로 어느 때보다 레미콘산업은 양질의 레미콘을 적기에 공급한다는 성숙된 모습을 보여야 할 구조조정을 하지 않을 수 없었다.

또한 레미콘 수요가 기존 도시중심의 수요편중에서 프로젝트중심으로 변화하면서 레미콘공장이 전국적으로 산재하게 되었으며, 지방화 시대의 도래로 지역 자체개발도 가능하게끔 전국 전 지역을 공급권역으로 확산하였다. 그러나 1990년대 초 중소업체를 중심으로 한 신증설 러시현상이 급속히 둔화되는 추세에 있으며, 1992년 후반부터 건설경기의 위축으로 레미콘업체의 경영난이 악화가 심화되면서 부도업체가 속출하게 되었다.

일본의 경우 내수시멘트의 레미콘 공급률이 70%에 달하였을 때 한계상황을 맞이하였다는 점을 감안할 때, 국내의 레미콘 전환율은 1994년 현재 60%수준으로 지속적인 성장가능성이 있었으며, 국내 시멘트수용의 한계는 6천만톤으로 1억4천만 ㎥가 레미콘수요의 한계점이 될 것으로 판단된다.

향후 레미콘산업은 품질향상, 생산성 향상, 원가 절감 등 경영합리화와 환경 및 공해 방지대책이 당면과제

이며, 특히 도시외곽지역으로 공장이전이 불가피한 경우 레미콘산업뿐만 아니라 건설업계에도 지대한 영향이 예상된다.

일본 등 선진국의 경우 완벽한 공해방지시설을 갖추거나 도심형 무공해공장을 설치·운영하기도 하는데, 국내에서도 이러한 공해방지시설의 완비와 도심형 무공해 공장의 설치가 논의되고 있으나 아직까지는 경제성의 난제에 부딪혀 있다.

점차로 콘크리트가 다양화하고, 고성능화 됨에 따라 고품질의 콘크리트를 안정적으로 제조하는 것이 더욱더 요구되므로 제조설비에서는 다양한 변동요인에 대응 가능한 시스템으로 전환하는 것이 현재의 당면 과제이다.

### 3.1.6 철근과 PS강재

(1) 철 근

철근 콘크리트는 1850년대에 프랑스의 Lambot나 1860년대의 F. Joseph Monier에 의해 개발된 것으로 알려져 있지만 역학적인 기본이론이 없었으며, 후에 독일의 Gustav A. Wayss와 J. Bauschinger에 의해 합리적인 배근방법이 제안되었다.

콘크리트는 전세계적으로 가장 보편적으로 사용되는 건설재료지만 압축강도에 비하여 인장강도가 작다는 가장 큰 단점을 갖고 있다. 이러한 성질을 개선하기 위해 여러 재료가 사용되지만 그 중에서도 가장 많이 사용되는 재료는 철근과 PS강재이다. 현재 사용되는 철근은 기본적으로 원형의 단면을 가지며 표면에 돌기를 가진 이형 철근이 사용되고 있다. 이러한 철근의 규격, 화학성분 및 물성치는 1962년에 제정된 KS D 3504에 규정되어 있다.

최근 철근 콘크리트 구조물은 그 크기와 규모가 장대화 및 대형화되고 있으므로 철근의 성능의 대구경화, 고장력화가 요구되며, 이에 따른 경제적이고 합리적인 설계와 시공이 가능하게 되었다. 국내에서는 서해대교, 울진 원자력 발전소, 영종대교 등의 현장에서 D35~D57의 대구경 철근이 사용된 예가 있으나, 선진국의 사용 실적에 비하면 아직 미미한 상태이며, 외국의 경우 SD 40 이상의 특수강을 사용한 특수철근을 개발하여 그 사용이 현실화되고 있는 실정이다.

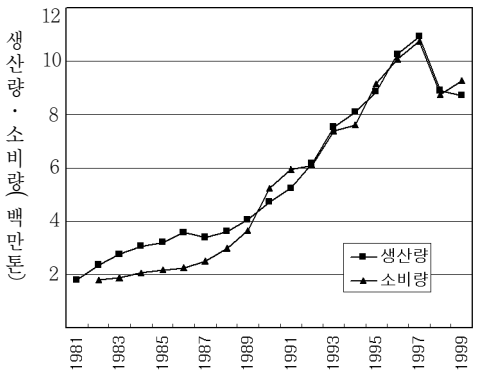

그림 3.3 국내 철근의 생산량과 소비량 변화

우리나라의 철강공업의 시작은 1918년 일본 미쓰비시(三菱)재벌이 세운 일본제철주식회사 염이포제철소에서 비롯되며, 생산은 연간 5만톤 규모이지만, 한국 공업사상 획기적인 일이었다. 또한 일본 고주파 공업주식회사 성진공장(1937)과 미쓰비시 공업주식회사 청진광업소(1939)가 뒤따라 설립되었고, 그 후에도 계속 신규공장이 설립되었으며, 1943년에 제천 제철주식회사에 이어서 북평에 당시 남한 유일의 제철공장인 삼화제철소가 건설되었다.

광복 후 철강공업은 침체상태에 들어섰으며 6·25동란 후의 선철생산은 거의 전무하였고 겨우 전쟁고철을 이용한 재압연업인 신철공장이 가동하는 정도에 불과하였다. 그러나 1956년 대한중공업(현 인천제철), 1958년 삼화제철에서 철강을 생산하기 시작하였고 1960년 대한중기, 서울제강, 대한제철 등의 제강공장이 대한중공업, 한국철강이 열간박판 압연공장을 강관제조분야도 1957년 기아산업, 1960년 부산철관, 1961년 일산제강, 동양공업이 가동을 개시했다.

국내의 철근생산은 1959년 대한중공업(현 인천제철)에서 인력가공으로 철근이 생산되기 시작했으며, 1972년부터는 자동화된 철근공장이 설립되어 자동화된 생산설비를 갖추게 되었다. 1997년에는 인천제철, 동국제강, 한국철강, 강원산업 등 12개 회사의 생산능력이 연산 1094만톤에 달했으나 IMF이후 감소하여, 1999년에는 연산 870만톤을 생산하였다. 특히 국내소비량은 1987년 이후 주택 200만호 건설을 비롯한 사

회간접자본 시설투자의 증가에 따라 건설경기가 급속히 성장하여 1992년 상반기까지는 철근공급부족 현상이 심화되어 수출을 제한하고 수입을 확대하는 등 공급확대에 노력했으나, 1992년 하반기에 주택 200만호 건설의 종료와 건설규제의 영향으로 소비증가가 둔화되었으며 IMF이후에는 급격한 감소를 보였다.

수출은 1992년에 국내공급과잉과 중국에서의 특수로 연산 76만톤으로 급격한 증가를 했으나, 1996년 30만톤, 1997년 26만톤으로 감소하였고, 1998년 IMF의 영향으로 125만톤에까지 이르렀으나, 다시 1999년에는 세계각국의 수입규제와 원화가치의 회복에 따라 64만톤에 그쳤다. 한편 수입은 1992년에는 68만톤에 달했으나, 상반기까지 국내수요충족을 위해 대량으로 반입되었던 물량이 국내철근생산량 확대와 수요감소, 수입철근의 품질저하 등의 이유로 소비되지 못하고 역수출되기도 하였다. 수입량은 이후 급감하여 1996년 10만톤, 1997년 10만톤, 1998년 2만톤으로 감소하였다.

그림 3.3은 국내의 철근생산과 소비추세를 도시하고 있다. 국내의 생산량과 판매량을 살펴보면 IMF이후 1998년에는 생산과 판매 모두 급격히 감소하였으며, 1999년에는 철근의 생산량은 소폭 감소했지만 소비량은 약간 증가하였다. 특히 내수판매량이 17%이상 증가하여 회복세를 보였지만 아직은 IMF이전인 1997년의 수준에는 도달하지 못하고 있다.

1980년대까지는 SD 24, SD 30이 많이 사용되었고, 1990년도에 접어들면서 SD 40의 사용이 급증하였으며, 1990년대 말부터 SD 50, SD 685의 생산준비에 들어갔다.

철근 콘크리트의 내구성 문제에서 가장 큰 문제는 철근의 부식인데, 특히, 해안 구조물의 콘크리트에는 염분이 침투하기 쉬우므로 특별한 대책이 필요하다. 침입한 염분이 콘크리트 속의 철근을 녹슬게 하는 염해를 방지하는 방법에는 부식되지 않는 강재를 사용하거나 부식방지가공을 하여 사용하는 방법이 있는데, 전자는 가격이 비싸 실용적이지 않으며 후자의 경우는 많은 공법이 개발되고 있지만 현재 품질기준이 정비되어 실용화되고 있는 것은 아연도금 철근과 에폭시수지 도장철근이다.

아연도금 철근은 철근에 아연도금을 한 것이라서 철근의 부착성능이나 피막의 견고함이 뛰어난 반면 염분의 농도가 진해지면 장기적인 방식성 확보에는 아직 문제가 있으므로 많이 사용되고 있지는 않다.

에폭시수지 도장철근은 미국에서는 1970년대부터 사용되고 있는 철근으로서 이형철근의 표면에 180~200미크론의 두께로 에폭시수지 도장을 한 것이다. 휨가공이 가능한 온도에 따라 난색계(20℃이상에서 휨가공 가능)와 한색계(5℃이상에서 휨가공 가능) 색을 한 것이 있지만, 방식성능은 같다.

에폭시 도장철근을 사용할 경우의 주의사항으로는 정착길이나 중첩이음의 길이를 보통 철근보다 20% 이상 길게 할 것과 철근을 조립하는 중이나 가공 중에 생긴 도장의 큰 손상에는 보수를 해야 하며, 에폭시 도장철근은 유기수지를 이용하고 있으므로 고온에서의 내구성에 유의해야 한다. 예를 들면 화재 시 콘크리트와의 부착성의 약화를 가져올 수 있으므로 주의해야 한다.

국내에서는 영종대교, 서해대교 등의 해안 교량에서 최근 사용되기 시작하였으나, 제설제로 염분을 다량으로 살포하고 있는 캐나다 등에서는 도로 구조물의 90%이상이 에폭시수지 도장 철근을 사용하고 있으므로 동결기가 잠시 지속되는 국내에서도 많이 사용될 것으로 예상된다.

향후에는 콘크리트구조의 내구성 확보의 이유 때문에 철근의 대체재료로 고분자 보강근이 도입될 것으로 전망된다.

(2) PS강재

현재 PS콘크리트에 사용되는 PS강재에는 PS강선, PS스트랜드, PS강봉의 3종류가 있다. 1956년 중앙산업(주)이 PSC 침목을 BBRV공법으로 제조한 것이 PS콘크리트의 효시이고, 1961년에는 같은 BBRV공법으로 길이 23m의 PSC보를 시험제조한 것이 국내의 PS콘크리트의 첫 출발이다. 1962년 3월에는 우리나라 최초의 PSC교량인 구운교(거더길이 16m, 6경간)가 프레시네(Freyssinet) 공법으로 협화실업(주)에 의해 착공되었고, 같은 해 6월에 서울의 원효교(거더길이 20m, 5경간)가 현대건설(주)에 의해 PSC거더로 착공된 이래 PSC교량시대가 국내에 전개되기 시작했다.

국내에 PS콘크리트가 도입된 초기에는 주로 수입된 PS강선이 사용되었고, 1960년대말부터 고려제강(주)을 중심으로 국내에서 PS강선이 생산되기 시작하였다. 1981년에 준공된 원효대교는 DYWIDAG공법과 FCM(free cantilever method)에 의해 PS강선봉을 사용하면서 PS강봉을 사용하였으나 수입품이었다.

1980년대초 국내에 PSC 박스거더교가 FSM공법(full staging method)과 VSL공법에 의해 건설되기 시작하면서 PS강 스트랜드가 사용되기 시작했고, 1990년대부터는 로우 릴랙세이션(low relaxation)의 PS강 스트랜드가 국내에서 생산되어 모든 PSC교량에 사용되고 있으며, 대부분의 PSC교량이 이 로우 릴랙세이션의 PS강 스트랜드에 의해 건설되고 있다.

향후에는 탄소섬유, 아라미드 섬유, 유리섬유, 비닐론 섬유등의 PS복합재료가 철근과 PS강재를 대신할 것으로 전망된다.

### 3.1.7 거푸집과 동바리

콘크리트 공사에서 굳지않은 콘크리트가 경화하여 소요강도를 발현하고 구조물의 형상을 구현할 때까지 거푸집과 동바리는 매우 중요한 역할을 한다. 또한 거푸집과 동바리의 재료와 구조는 콘크리트공사의 안전성, 전체 공사비, 공기에 미치는 영향이 매우 크기 때문에, 공법과 재료의 개발 및 개량에 대한 연구와 노력이 오래전부터 현재까지 이어졌고 향후에도 계속될 것이다.

거푸집 재료면에서 1950년대 말까지 국내에서는 주로 목재의 각재와 판재를 이용하는 거푸집, 통나무를 이용한 동바리가 사용되었고, 1960년대부터 합판과 강판이 거푸집에 본격적으로 사용되기 시작했다. 1980년대부터는 공사비와 공기문제를 해결하기 위하여 거푸집에는 합판과 목재 이외에도 철강재 알루미늄, FRP, 플라스틱, 고무, 석고보드, 아크릴 수지나 염화비닐계의 투명거푸집, 문양표면을 위한 거푸집, 단열겸용 거푸집 등이 사용되기 시작했다.

그리고 같은 기간에 각종 시스템 거푸집과 특수 거푸집이 새로 개발되기 시작하였다. 그 예로서 현장조립형 핸드셋 폼(handset form), 공장조립형 핸드셋 폼, 플라잉 폼(flying form), 클라이밍폼(climbing form), 탈형하지 않는 거푸집, 탈수 거푸집, 잉여수 배출형 및 흡수형 거푸집 등이 사용되기 시작했고, 장경간 교량과 높은 교각건설용으로 거푸집과 동바리를 겸한 복합 기능으로서 이동식 거푸집(traveling form)을 이용하는 FCM(free cantilever method), 거푸집과 동바리를 경간 단위로 이동시키는 MSS(movable scaffolding system), 슬립 폼(slip form) 등이 사용되었다. 최근 영동고속도로 확장구간에 건설된 높은 교각건설에 슬립 폼이 적용되기도 하였다.

한편 1970년대까지 동바리용으로 사용되던 통나무는 서서히 사라지고, 1970년대 말부터는 강관비계와 강재 뼈대 동바리(steel frame shoring)가 등장하였고, 교량공사에서는 FSM(full staging method)대신에 장경간교량의 건설에 PSM(precast segmental method), ILM(incremental launching method), 슬립 폼 등의 새로운 시스템 동바리가 사용되면서 오늘날까지 이어지고 있다. 대표적인 예로 한강상의 원효대교가 FCM공법, 노량대교가 MSS, 강변북로와 북부내부순환도로가 PSM, 대전근처의 금곡천교가 ILM 공법으로 최초 시공된 교량들이다. 1980년경부터 이상의 신재료, 신기술, 신공법과 시스템 거푸집 및 동바리의 출현은 콘크리트교량건설 기술의 혁신과 경쟁력을 불러일으킨 계기가 되었다.

## 3.2 철근콘크리트교

### 3.2.1 콘크리트교의 탄생

콘크리트교가 세상에 태어나기까지에는 많은 연구자의 노력이 있었다. 즉 1824년 영국 J. Aspdin의 시멘트 발명, 1955년 프랑스인 J. L. Lambot의 철근콘크리트 소형 모형배의 특허, 1867년~1877년 사이의 프랑스인 J. Monier의 철근콘크리트 원예용 화분, 탱크, 교량, 보와 기둥 특허, 1867년 독일인 M. Koenen의 「철근콘크리트구조의 이론과 설계」 서적 출판, 1898년

프랑스인 F. Hennebique의 구조실험과 배근방법 특허, 1906년 프랑스의 첫 철근콘크리트 시방서 제정, 1928년 프랑스 E. Freyssinet의 프리스트레스트 콘크리트의 발명을 거쳐 오늘에 이르게 되었다.

무근콘크리트이긴 하지만 콘크리트가 교량에 처음 사용된 것은 1840년 프랑스의 그리솔레(Grisoles)에 있는 갸론느(Garoyne) 운하를 건너는 경간 12m의 교량과 1869년 파리 수로아치교이다.

첫번째 철근콘크리트 구조물은 1875년 J. Monier에 의해 프랑스에 건설된 폭 4m, 길이 16m의 철근콘크리트 교량이고, 그 다음이 1897년 미국에 세워진 경간장 9.1m의 철근콘크리트 아치철도교, 1900년 프랑스 비엔느(Vienn)강을 건너는 샷델롤프(Chattelleraulf) 아치교이다. 이후에는 1873년 프랑스에서 교육받고 돌아간 E. Ransome 등 미국 기술자들에 의해서 유럽보다는 미국에서 콘크리트 교량의 건설기술이 발전 보급되었다. 즉 1889년 샌프란시스코 금문공원(Golden Gate Park) 내에 건설된 폭 19.5m, 경간장 6m의 알보드 레이크(Alvord Lake)교를 필두로 1930년대 초까지 경간장 43m까지의 많은 철근콘크리트 단순 및 연속 아치교가 미국 내의 도처에서 건설되었다.

유럽에서는 1925년 스페인에서 PSC 사장교로 건설된 템플(Temple)교와 1930년 콘크리트 박스거더로 건설된 스위스의 살지나토벨(Salginatobel) 아치교를 필두로 수많은 철근콘크리트 아치교와 거더교가 건설되기 시작했다. 1949년에는 독일의 퍼차(Percha)교가 최초로 캔틸레버공법에 의해 철근콘크리트로 건설되었고, 1963년에는 프랑스 쇼아지 르 루아(Choisy Le Roi)교가 처음으로 세그멘탈공법으로 건설되었으며, 1969년에는 스위스 쥬리히의 보도교에 경간장 40m의 콘크리트 현수교, 1977년 프랑스의 브로톤느(Brotonne)교(주경간장 320m)가 최초로 PSC 사장교로 건설되었고, 1980년에는 세계 최대 경간장(390m)의 PSC 아치교인 커크(Kirk)교가 건설되었다.

### 3.2.2 콘크리트교의 도입

1894년 우리나라를 찾아왔던 영국인 Bishop여사의 수기에 따르면, 인천에서 서울까지에는 노폭 1m정도의 꼬불꼬불한 논두렁길이고, 서울시내의 거리는 두 마리 소가 나란히 갈 수 없을 정도였다고 기록하고 있다. 그러나 1896년 우리나라 최초의 도로규칙이 제정되고, 서울시내 주요 간선도로 폭을 55자(尺)즉 16.5m로 정한 이 도로규칙에 의해 현대적 개념의 도로가 정비되기 시작했지만 철도건설에 밀려 도로건설이 거의 추진되지 못하였었다. 일제의 침략과정 중 1906년에 치도국(治道局)이 설치되면서 서울을 중심으로 인천, 해주, 진남포, 의주, 경흥, 나주 등의 주요도시를 연결하는 9개의 상업 간선도로가 건설되기 시작했다. 한일 합방 다음해인 1911년에 모든 도로를 1,2,3등 및 등외의 4종류로 구분하고, 곡선반경, 교량구조의 규제화가 시작되었고, 이런 가운데 1912년 국내에 승합버스가 처음으로 도입되었고, 1913년부터 영업이 개시되었으며, 한편 1911~1917년 사이를 제1차 치도계획기간, 1918~1926년 사이를 제2차 치도계획기간으로 설정했고, 1926년 이후 2차 계획기간을 10년 더 연장하면서 전국에 1,2등 도로와 교량의 건설과 개수가 본격화되었다.

따라서 상기와 같은 역사적 배경으로 미루어 볼 때, 콘크리트가 교량에 처음 사용된 것은 1899년에 개통된 경인철도상의 교량 하부구조의 건설에 사용된 것으로 보는 견해가 유력하다. 국내에서는 정확한 기록은 없지만 1906년경부터 철근콘크리트 슬래브교, T형교, 아치교가 도로에 건설되기 시작한 것으로 추정되고, 이 중 아직도 사용되고 있는 것들도 상당수 있다. 1928년 말까지 영구구조물로 1546개, 반영구조물로 358개, 임시구조물로 2142개의 교량이 도로상에 건설되었다. 외국과 비교할 때 비록 일본기술진에 의해 건설되기는 하였지만 한반도에는 일찍 콘크리트 교량이 건설되었다고 할 수 있다.

철근콘크리트 교량형식으로 보면 1906년경부터 건설되기 시작한 국내의 철근콘크리트교는 주로 슬래브교, 중공슬래브교, T형교, 박스거더교, 라멘교, 아치교 등으로 건설되었다.

### 3.2.3 콘크리트 교량기술의 발전

철근콘크리트교는 구조의 특성 때문에 아치교를 제외

하고는 경간장이 비교적 짧은 교량에 적용된다. 철근콘크리트 슬래브교는 경간장 15m 이하, T형교는 15~40m, 박스거더교는 20~50m, 라멘교는 10~30m의 범위에 적용되는 것이 일반적이고, 건설공법은 대부분 동바리공법이기 때문에 외국의 경우와 마찬가지로 교량형식이나 구조면에서 현존하는 철근콘크리트교와 같은 진보된 구조물을 기대하기는 어려운 실정이었다.

1960년 이전에 건설된 철근콘크리트교의 콘크리트 설계강도는 140~210kg/㎠이었으나 1970년대부터 시작된 정밀진단조사에 따르면 대부분 300kg/㎠ 이상의 강도를 발현하는 것으로 조사되었고, 주철근으로는 원형철근이 주로 사용되었다. 1950~1953년 사이의 6·25 동란으로 상당수의 교량이 파손되었고, 1970년대 초부터 현재까지의 교량 정밀진단 결과에 따라 내하력과 사용성이 저하된 교량, 국도와 지방도의 선형개량과 확장공사로 인하여 1945년 이전에 건설되었던 교량이 대부분 철거되고, 도로교는 현재 표 3.2와 같이 182개 교만이 남아 있다.

1961년부터 시작된 정부의 경제개발계획의 일환으로 건설된 각종 고속도로, 산업도로, 국도, 지방도에도 전과 같이 소형교량에는 철근콘크리트 교량이 주로 적용되고 있으나, 교량의 형식, 구조, 건설공법상의 특이성은 없다. 다만 교량의 설계에 1970년대부터 전자계산기와 각종 해석 및 설계 S/W가 사용되었고, 1988년부터 설계방법은 허용응력설계법에서 강도설계법으로 변천되었으며, 콘크리트의 강도는 210~270kgf/㎠으로 상향적용되었고, 주철근에는 SD 24에서 SD 30, SD 35, SD 40의 이형철근이 사용되고 있다. 현장의 인력시공에 의존하던 콘크리트의 생산, 운반, 타설은 모두 기계화시공으로 바뀌면서, 현장의 품질관리와 시공관리기준이 엄격해졌고, 목재 위주의 거푸집과 동바리 대신에 신재료, 새로운 개념의 시스템 거푸집과 동바리가 사용되기에 이르렀다.

1998년 12월 현재 남한에 있는 전체 도로교량의 수는 15,270개이고 총 교량연장은 1009km에 이른다. 국내의 교량 중에서 가장 긴 교량은 부산광역시의 동서고가교(연장 10,865m)이고, 가장 짧은 교량은 대구광역시의 덕골교(연장2m)이다. 현존하는 교량을 1998년 12월 말 현재로 도로 종류별, 건설시기별로 정리하면 표 3.2와 같고, 도로 종류별, 설계하중별 교량현황은 표 3.3과 같다.

우리나라에서 현재 사용되고 있는 교량 중 가장 오래된 도로상의 RC T형 교량은 1910년에 건설된 전남 나주시의 안영교(安榮橋, 교장 9m, T형교, 그림 3.4), 안창교(교장 9m), 구진교(교장 9.8m)이다. 그리고 가장 오래된 RC라멘교는 1923년에 건설된 경남 창원시

표 3.2 도로종류별, 건설시기별 교량현황 (1998. 12 현재)

| 구 분 | 합 계 | 고속국도 | 일반국도 | 특별시도 | 국가지원지방도 | 지방도 | 시 도 | 군 도 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 합 계 | 15,270 | 1,936 | 3,293 | 1,076 | 712 | 3,070 | 1,620 | 3,563 |
| 45년이전 | 182 | - | 37 | 22 | 20 | 43 | 24 | 36 |
| 45년~58년 | 67 | - | 24 | 7 | 3 | 15 | 9 | 9 |
| 59년~68년 | 618 | 11 | 156 | 67 | 50 | 155 | 82 | 97 |
| 69년~78년 | 2,848 | 331 | 453 | 252 | 121 | 554 | 317 | 820 |
| 79년~현재 | 11,555 | 1,594 | 2,623 | 728 | 518 | 2,303 | 1,188 | 2,601 |

표 3.3 도로종류별, 설계하중별 교량현황 (1998. 12 현재)

| 구 분 | 합 계 | 고속국도 | 일반국도 | 특별시도 | 국가지원지방도 | 지방도 | 시 도 | 군 도 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 합 계 | 15,270 | 1,936 | 3,293 | 1,076 | 712 | 3,070 | 1,620 | 3,563 |
| DB 24 | 6,074 | 1,516 | 1,650 | 459 | 217 | 759 | 664 | 809 |
| DB 18 | 5,369 | 381 | 1,440 | 367 | 289 | 1,307 | 511 | 1,074 |
| DB 13.5 | 3,084 | 39 | 111 | 160 | 177 | 874 | 349 | 1,374 |
| 기타 | 743 | - | 92 | 90 | 29 | 130 | 96 | 306 |

의 외동교(교장 6.4m)이고, RC 박스거더교는 1932년에 건설된 경북 영양의 방전교(교장 6.0m)이고, RC 아치교는 1924년에 건설된 전남 화순의 연덕교(교장 5.8m)이다. 그리고 국내에서 처음으로 건설된 중공 슬래브교는 1966년에 건설된 강원도 정선의 용탄소교(교장 60m, 3경간)와 강원도 화성의 용탄대교(교장 120m, 6경간)이다.

그림 3.4 가장 오래된 콘크리트교인 안영교

광복 후 처음으로 건설된 철근콘크리트 교량은 1946년에 건설된 안동의 교장 320m의 법흥교(法興橋, 안동댐 아래에 위치)와 교장 360m의 합천의 남정교(南汀橋)이고, 이 두 교량은 기초공사에 나무말뚝 대신 철근콘크리트 말뚝이 사용되었다.

6·25동란으로 우리나라는 많은 분야에서 막심한 피해를 입었지만, 그 중에서도 교량의 피해가 가장 컸다. 1952년에 조사된 교량피해 상황은 표 3.4와 같다. 1955년부터 1961년까지는 주로 전란으로 손상된 교량을 복구하는 정도의 교량공사가 진행되었다.

1961년 경제개발계획에 따라 경인, 경부, 영동고속도로가 차례로 건설되면서 많은 콘크리트교량이 건설되었지만, 이상의 자료들로부터 미루어 볼 때 철근 콘크리트교는 콘크리트와 철근의 강도증가, 경간장의 증가, 연속교의 출현 외에는 특별한 변화는 없는 듯하다.

1960년대부터 1990년대 초까지 경간장이 긴 곳에 사용되던 RC 중공슬래브교와 RC 박스거더교는 설계, 시공, 유지관리의 복잡성 때문에 최근에는 잘 사용되고 있지 않는 실정이다. 다만 교량의 미관과 장경간 확보 면에서 철근콘크리트 아치교는 아직도 사랑을 받고 있는 편이고, 대표적인 RC 아치교에는 경부고속도로상에 있는 대전육교(그림 3.5)가 있다. 이 교량은 시공중 가설구조의 문제로 붕괴되었고, 그로 인해 경부고속도로의 개통일에 영향을 준 일도 있었다. 특히 2001년에는 한강상의 선유도와 양평동을 연결하는 선유도 연결 보행전용교량이 RPC(reactive powder concrete)로 제조되는 강도 1,700kgf/㎠의 초고강도 콘크리트 아치교로 착공되었다. 국내에서는 대부분 동바리공법에 의하여 콘크리트 아치교가 건설되었지만, 향후 선진국과 같이 캔틸레버 공법을 적용하면 경간장이 100m가 넘는 콘크리트 아치교도 공사기간과 건설경비를 감소시키면서 건설될 전망이다.

그림 3.5 대전육교

RC 라멘교는 1923년의 창원 외동교, 1936년 9월에 준공된 서울의 광진교(1998년 철거된 후 강교로 건설됨), 1965년 5월 3일 준공된 정선선(현재의 태백선) 예미-조동간의 다창 다경간의 RC라멘철도교가 건설된 이래 현재까지도 도로교, 철도교 등에 많이 사용되고 있으며, 대표적인 교량을 예시하면 국도 19호선상의 충주의 목행대교와 경부고속도로상의 추풍령 휴게소 횡단

표 3.4 6·25 동란으로 인한 도로교의 피해상황(1952년) (단위: m)

| 등 별 | 영구교량피해 | | | 목교피해 | | | 계 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 계 | 연장 | 피해 | 계 | 연장 | 피해 | 계 | 연장 | 피해 |
| 국 도 | 287 | 23,197 | 10,461 | 211 | 5,904 | 5,458 | 498 | 29,101 | 10,919 |
| 지방도 | 255 | 11,506 | 5,751 | 566 | 11,002 | 10,865 | 321 | 22,508 | 16,626 |
| 계 | 651 | 34,703 | 16,222 | 777 | 15,905 | 16,323 | 1,319 | 51,609 | 32,545 |

육교를 들 수 있다. 더욱이 π형 라멘교가 1960년대에 출현하면서 교량미와 장경간의 과도교 및 과선교에 널리 사용되고 있는데, 예시하면 88올림픽 고속도로를 횡단하는 금평육교를 들 수 있다.

RC 슬래브의 자중을 감소시켜 일반 슬래브교보다 장경간에 적용할 수 있는 RC 중공슬래브는 1966년 정선의 용탄소교와 용탄대교의 건설후 1995년도까지 고속도로 교량에 31개, 국도교량, 분당등의 신도시 개발과 댐 진입로등에 많이 사용되었으나, 설계의 복합성, 시공중의 품질관리의 어려움, 중공슬래브 하면의 균열, 용담댐 진입로상의 교량붕괴 등의 원인 때문에 1995년 이후에는 그 사용량이 격감한 실정이다. 한편 RC 박스거더의 경우도 RC중공슬래브와 마찬가지로 1990년대부터 잘 사용되지 않고 있다.

1998년 12월 현재 전국에는 8,826개의 RC 슬래브교, 1,328개의 RC T형교, 151개의 RC 중공슬래브교, 1,917개의 RC 라멘교, 65개의 RC 박스거더교, 그리고 20여개의 RC 아치교가 있다.

## 3.3 프리스트레스트 콘크리트교

### 3.3.1 프리스트레스트 콘크리트교의 출현

현재와 같은 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 기술이 거의 모든 구조에 적용할 수 있게 되기까지는 많은 시간과 노력이 필요하였다. 1872년 미국의 P. H. Jackson이 프리스트레싱 시스템(prestressing system)을 착상하고, 1888년 독일의 C. W. Doehring이 PSC(prestressed concrete) 슬래브를 개발하였지만 시간 경과에 따른 프리스트레스의 감소로 실패하였고, 20세기 초에도 노르웨이의 J. Lund와 미국의 G. W. Steiner가 이 문제를 해결하려 하였으나 실패하였다. 같은 시기에 미국의 R. E. Dill은 응력손실을 극복하기 위하여는 고강도 강재가 필요하고, 콘크리트의 크리프와 건조수축의 영향이 크다는 사실을 찾아내고, 포스트 텐셔닝(post-tensioning)의 개념도 창출해냈다.

1926~1928년 사이에 프랑스의 E. Freyssinet가 연성이 큰 고강도 강재에 의하여 응력손실을 극복할 수 있는 방법을 정립한 후, 1940년에는 원추형 쐐기로 된 PS 강재 정착장치를 포함한 프레시네 시스템을 발표하면서 PS 콘크리트는 빛을 보기 시작했다. 이때문에 Freyssinet는 PSC의 가장 위대한 공로자로 인정받게 되었다. 이 이외에도 1930~1960년 사이에 PSC 기술의 발전에 크게 기여한 기술자에는 파셜 프리스트레스(partial prestress)를 개발한 영국의 P. W. Abeles, 하중균형법(load-balancing method)을 제안한 미국의 T. Y. Lin, 독일의 F. Leonhardt, 러시아의 V. Mikhailov, 유럽의 PSC 교량의 설계와 건설을 위한 독자적 프리스트레싱 개념을 개발한 벨기에의 G. Magnel과 프랑스의 Y. Guyon 등이 포함된다.

1945년 제2차 세계대전 후 많은 나라들이 전후복구에 착수하였으나 전쟁 후유증으로 철강재의 부족이 심화되면서 PSC 교량의 건설이 급속도로 확산되었고, 그에 발맞추어 1960년대 이후에는 전자계산기를 이용한 새로운 설계기법, 균형 FCM(balanced free cantilever method), 압출공법(ILM : incremental launching method), 이동식 비계공법(MSS : movable scaffolding method), 프리캐스트 콘크리트 세그멘트 공법(PSM : precast-concrete segmental method), 기타 각종 프리캐스트 거더공법, 로우 릴랙세이션(low relaxation) PS 강재와 익스터널 텐던(external tendon) 등과 같은 새로운 PS 강재와 정착장치, PS 강재의 긴장장치와 긴장방법 등이 속속 개발되었다. 이와 같은 신기술의 개발은 PSC 구조의 응용범위를 확대시켰고, 새로운 PSC 구조시스템의 개발에도 크게 기여하였다.

우리나라에서는 1950년 초부터 토목기술자간에 화제가 되어 1957년 교통부의 계획으로 중앙산업(주)이 PSC 침목을 B.B.R.V 공법으로 제조하기 시작한 것이 PS 콘크리트의 시작이며, 1961년에는 같은 B.B.R.V 공법으로 길이 23m의 PSC 보를 시험제작하였다.

1962년 3월에는 우리나라 최초의 PSC 교량인 구운교(가평군 외서면 대성리 소재, 거더의 길이 16m, 6경간)가 Freyssinet 공법으로 협화실업(주)에 의해 시공되었고, 동년 6월에 원효교(서울 원효로 4가 소재, 거더의 길이 20m, 5경간)가 현대건설(주)에 의해 시공

되었으며, 1963년 영월 제2화력발전소 인입선에 무연탄 하차용 철도고가교인 발전교(發電橋)가 단순 PSC I형 거더(거더길이 15m, 20개 거더의 단선병렬배치)와 프레시네 공법에 의한 포스트텐션 방식으로 건설된 이래, 저렴한 공사비, 용이한 품질관리와 유지관리, 공사기간 단축, 저렴한 유지관리비 등 때문에 국내 PS 콘크리트 교량에는 1998년 현재로 1,558개의 PSC I형 거더교, 100개의 PSC 슬래브교, 18개의 PSC 중공슬래브교, 129개의 PSC 박스거더교, 191개의 프리플렉스 합성거더교, 그리고 PSC 사장교 등이 건설되었고, 현재도 많은 PS 콘크리트 교량이 건설중에 있다.

### 3.3.2 PSC I형 합성거더교

1961년 5·16혁명 이후 군사정부가 경제개발을 촉진하면서 사회간접시설 확충을 위하여 도로의 신설 및 개량사업에 착수하였다. 이 당시만 해도 예산의 제약과 건설자재의 부족, 특히 강재의 부족으로 인하여 교량은 철근콘크리트 T형교로 대부분 건설되었고, 경간장이 20m 이상 되는 경간에는 철근콘크리트 박스거더가 채택되었다.

1962년부터 미국무성 초청에 의하여 미국에서 연수한 건설공무원들이 도로 공사현장을 견학하고 많은 설계자료들을 도입하였는데, 이 가운데 PSC 거더 제작설계도와 합성거더 설계법 및 응력계산서 등이 포함되어 있었다. 이것들을 참고하고 PS 콘크리트에 관한 기술서적들을 입수하여 기술자들의 중지를 모아 PSC 합성거더교를 설계한 효시가 되었다. 전술한 경기도의 구운교, 서울의 원효교, 영월의 발전교를 필두로, 제2왜관교(30m경간, 건교부 부산청), 중량교(25m경간, 서울시) 등이 PSC 합성거더교로 설계되었다. Φ6~Φ8 강선과 정착장치는 모두 수입되었고, 콘크리트 강도는 350kgf/㎠ 정도로 오늘날과 비슷하였다.

이후 1960년대 중반에는 서울시내에 아현고가교(그림 3.6)와 보도육교가 PSC I형 거더로 건설되면서 기술이 축적되기 시작하였다. 1968년도에 착수한 경부고속도로를 위시하여 전국의 동서남북으로 뻗는 고속도로와 국도 및 지방도상의 각종 교량건설에 PSC 합성거더

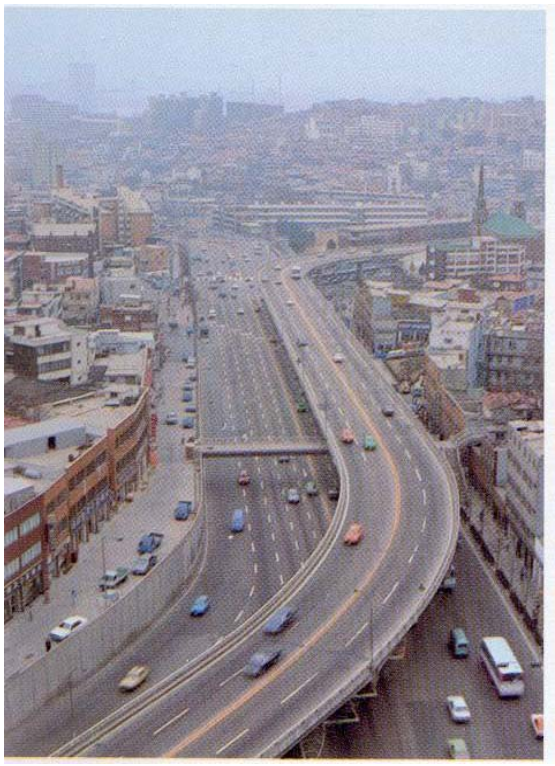

그림 3.6 아현고가교

교가 무수히 사용되었고, 1970년대 후반부터는 서울지하철 2호선의 고가전철교량도 PSC 합성거더로 건설되었다. 거더길이는 5m로부터 30m에 이르고 교량 공사현장에서 임시 제작장을 두고 제작하였는데, 프리스트레싱은 포스트텐션닝 방식과 프리텐션 방식을 병용하였지만 대부분 포스트텐션닝 방식이었다. 전술한 바와 같이, 초기에는 강선과 콘을 비롯한 프리스트레싱 장비(후레시네 잭)를 도입하였으나, 수요가 폭발적으로 증가하면서 강선과 강연선은 고려제강(주)에서 1960년대 말부터 국산화하여 오늘에 이르고, 콘은 (주)박·콘에서 제작하였는데 이 콘은 콘크리트 제품이었다.

PSC 거더의 단면형상은 거의가 I형이었으나, IBRD 차관사업으로 건설한 국도의 확·포장공사에서 T형 단면이 사용되었다.

1984년도에 준공한 대구-광주를 잇는 88올림픽고속도로상의 많은 교량도 경간 20m~30m의 PSC 합성거더교로 건설되었다. 그 중에서 중앙고속도로와 연결되는 금호 IC는 턴키로 발주되었는데, 경간 42m의 PSC

합성거더교로 응찰한 것이 낙찰되어 40m가 넘는 장대형 PSC 거더 제작 및 가설에 성공하였다. 여기에 소요된 Φ8 강선과 콘은 국산을 사용하였고, 콘크리트 압축강도는 kgf/㎠=400kgf/㎠이었다. 이 당시만 해도, 운반장비와 가설장비가 빈약하여 PSC 거더의 무게를 최대한 줄여 경제적인 설계를 하고자 고안한 것이 강선을 단계적으로 긴장하는 방법이었다. 즉, 12-Φ8의 케이블이 전체 14본이었는데, PSC 거더를 제작할 때 1차로 10본을 긴장하고, PSC 거더를 거치하고 상판 콘크리트를 타설하여 양생 후 합성효과가 발휘될 때 2차로 나머지 4본을 긴장하여 완성시키는 것이었다. 거더높이는 2.15m이고 포스트텐션닝 방식이었다. 한편 1986년 12월에는 호남복선 월계천 철도교가 경간장 18m의 6경간 단순 PSC I형 합성거더교로 건설되었다.

1990년대로 진입하면서 한국도로공사에서 건설한 고속도로사업에서도 40m가 넘는 장대 PSC 합성거더가 사용되었다. 여기에는 강선 대신에 Φ12.7 강연선과 철재콘이 사용되었고 일괄 포스트텐션닝 공법으로 제작되었다. 최근에는 U형단면이나 복T형(double T-type) 단면의 PSC 거더가 국부적으로 사용되고 있으며, 단순거더를 교각위에 거치한 후 슬래브만을 연속화시키는 연속화공법도 널리 이용되고 있다.

한편 PSC 거더교의 건설과 관련된 실패 사례도 있다. 동절기 공사에서 콘크리트의 양생이 부실하여 목표강도에 이르기 전에 긴장하거나 시즈관 내에 고인 물이 동결되어 PSC 거더 하면에 종방향으로 균열이 발생한 사례, 프리스트레싱이 목표값에 미달하여 PSC빔이 아래로 처지면서 균열이 발생한 사례, 시즈관과 시즈관 연결부의 부실로 인하여 시즈관이 시멘트풀로 폐색된 사례, PSC 거더의 거치중에 부주의로 전도되어 파괴된 사례, 그리고 PS 케이블의 편중배치로 인한 거더의 굽어짐 등의 사례가 있었다.

### 3.3.3 PSC 박스거더교

1978년 착공하여 1981년에 개통한 원효대교는 한강에서 13번째 건설된 교량으로 프리스트레싱은 디비닥(Dywidag)공법, 콘크리트 타설은 FCM(free cantilever method) 공법으로 PSC 박스거더교가 우리나라에서 처음으로 건설되었다(그림 3.7). 서울시에서 발주하고 동아건설산업(주)에서 민자로 건설하였으며 (주)한국종합에서 설계하였다. 교량연장은 1,470m, 폭은 20m(4차선)이고 중앙경간은 100m, 경간중앙에 힌지를 설치한 간단한 라멘구조이며, 2실 박스단면이고 지점부 거더높이는 6m, 중앙부 2.1m인 변단면이다.

콘크리트의 압축강도는 400kgf/㎠이고 강봉(Φ32, Φ36), 커플러, 앵커철물 등은 모두 독일에서 수입하였으며, 이동식 거푸집(form traveller)은 국내에서 설계·제작하였고, 교축방향으로 Φ36 강봉을, 횡방향으로는 Φ32 강봉을 배치하여 양방향으로 긴장되었다.

그 당시만 해도, 강봉의 시공긴장계획표와 주형의 시공캠버도를 작성할 수 없어 2명의 독일인기술자(Mr. Bata와 Mr. Pfenning)를 초빙하여 기술지원을 받았다. 그러나 이 원효대교의 시공중 서울시 행정책임자의 오판으로 교각 사이의 중간 힌지부에 캠버를 두지 않은 관계로 힌지부에 처짐이 발생하였고, 이 처짐의 일부를 회복시키기 위한 보수공사가 1998년에 수행되기도 하였다.

호남고속도로를 확장하면서 1983년도에 착공한 금곡천교는 우리나라에서 ILM(incrementally launching method) 공법을 도입하여 건설한 최초의 교량이다. 교량의 연장은 330m, 경간길이 42m, 8경간 연속박스형(1실)교이다. 이 교량의 설계당시에는 스위스 VSL사로부터 기술지원을 받았고, 가설할 때는 영국 STRONGHOLD사의 기술지원을 받았으며, 긴장재는 국산 강연선(Φ12.7)을 사용하였다.

1984년도에 착공하여 1986년도에 준공한 황산교는

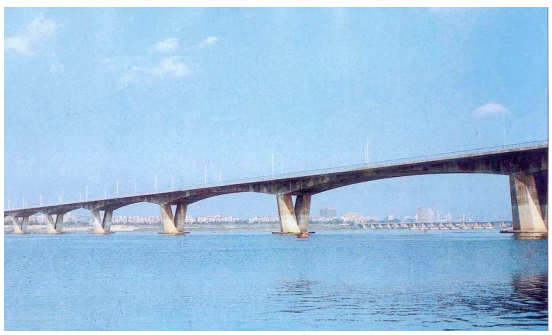

그림 3.7 원효대교

표 3.5 ILM공법으로 가설된 교량

| 교량명 | 연장(m) | 경간(m) | 교폭(m) | 발 주 처 | 착공연도 | 준공연도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 금곡천교 | 330 | 42 | 11.7 | 한국도로공사 | 1983 | 1984 |
| 염창교 | 270 | 40 | 22.4 | 서울시 | 1983 | 1985 |
| 황산교 | 1050 | 50 | 12 | 충남도청 | 1984 | 1986 |
| 장작교 | 305 | 45 | 23.8 | 한국도로공사 | 1985 | 1987 |
| 하번2교 | 405 | 45 | 23.8 | 한국도로공사 | 1985 | 1987 |
| 미호천1교 | 500 | 50 | 23.8 | 한국도로공사 | 1985 | 1987 |
| 미호천2교 | 210 | 50 | 10 | 한국도로공사 | 1985 | 1987 |
| 미호천3교 | 260 | 50 | 11 | 한국도로공사 | 1985 | 1987 |
| 만경강교 | 600 | 60 | 8.2 | 건교부이리청 | 1985 | 1987 |
| 의암교 | 720 | 60 | 13.6 | 건교부원주청 | 1985 | 1988 |
| 연도교 | 510 | 50 | 11 | 건교부이리청 | 1986 | 1989 |
| 남대천교 | 450 | 45 | 12 | 한국도로공사 | 1986 | 1988 |
| 경강교 | 650 | 50 | 20 | 건교부서울청 | 1987 | 1989 |
| 정암교 | 400 | 50 | 11 | 경남도청 | 1987 | 1989 |
| 무한교 | 347 | 40 | 12.5 | 건교부대전청 | 1987 | 1989 |
| 행주대교 | 1460 | 60 | 14.5 | 건교부서울청 | 1987 | 1994 |
| 단성교 | 240 | 42.5 | 23.9 | 경남도청 | 1988 | 1989 |
| 신구교 | 330 | 60 | 12 | 충남도청 | 1988 | 1989 |
| 거여고 가교 | 962 | 50 | 12.5 | 한국도로공사 | 1988 | 1990 |
| 동강교 | 900 | 50 | 16.7 | 건교부익산청 | 1989 | 1990 |
| 남지대교 | 700 | 50 | 12.1 | 건교부부산청 | 1989 | 1991 |
| 홍천강2교 | 550 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1989 | 1994 |
| 원창4교 | 320 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1989 | 1994 |
| 남한강교 | 540 | 60 | 12.1 | 한국도로공사 | 1989 | 1994 |
| 서강대교 | 1200 | 60 | 29 | 서울시 | 1989 | 1998 |
| 봉양교 | 400 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1990 | 1994 |
| 풍산대교 | 610 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1990 | 1994 |
| 제2수영교 | 500 | 50 | 20 | 부산시 | 1990 | 1993 |
| 성주대교 | 1080 | 60 | 10.5 | 건교부부산청 | 1990 | 1994 |
| 안흥항연육교 | 630 | 60 | 10.5 | 충남도청 | 1990 | 1992 |
| 구포교 | 953.7 | 56.1 | 30 | 부산시 | 1990 | 1995 |
| 경부미호천교 | 430.7 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1991 | 1993 |
| 강천2교 | 350 | 50 | 12.5 | 한국도로공사 | 1991 | 1994 |
| 섬강교 | 530 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1991 | 1994 |
| 지정교 | 780 | 50 | 12.1 | 한국도로공사 | 1991 | 1994 |
| 백곡교 | 540 | 50 | 10.5 | 경남도청 | 1992 | 1995 |

연장이 무려 1,050m로서 국내에서 ILM 공법으로 가설한 교량 중에서 최장으로 경간길이 50m의 21경간 연속박스거더교(1실)의 2차선 교량이다. 또한 철도교에서는 1987년 9월에 광양제철소 인입선인 광양만 제2철도교(경간장 40m의 20경간)가 ILM공법으로 건설되었고 국내에 건설된 ILM교량은 표 3.5와 같다.

그림 3.6 FSM공법으로 가설된 교량

| 교 량 명 | 연장(m) | 경간(m) | 교폭(m) | 발 주 처 | 착공연도 | 준공연도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 영동1교 | 140 | 40 | 50 | 서울시 | 1982 | 1983 |
| 영동7교 | 64 | 23 | 20 | 서울시 | 1982 | 1985 |
| 영동5교 | 105 | 45 | 35 | 서울시 | 1983 | 1985 |
| 영동6교 | 120 | 50 | 50 | 서울시 | 1983 | 1985 |
| 공주대교 | 480 | 60 | 22 | 건교부대전청 | 1983 | 1986 |
| 낙동강하구연 | 513 | 51.5 | 17.5 | 수자원공사 | 1983 | 1987 |
| 청담교 | 500 | 60 | 17.4 | 서울시 | 1983 | 1984 |
| 상번1교 | 135 | 45 | 23.8 | 한국도로공사 | 1985 | 1987 |
| 청주IC육교 | 80 | 30 | 23.8 | 한국도로공사 | 1985 | 1986 |
| 서청주육교 | 100 | 40 | 23.8 | 한국도로공사 | 1985 | 1986 |
| 덕산육교 | 91.2 | 45 | 23.8 | 한국도로공사 | 1986 | 1987 |
| 미호천교 | 480 | 50 | 23.8 | 한국도로공사 | 1986 | 1987 |
| 주포천교 | 191 | 52.5 | 13.7 | 한국도로공사 | 1989 | 1984 |
| 제2도시고속도로 | 12,700 | 50 | 19 | 부산시 | 1989 | 1984 |

황산교는 처음에 FSM(full staging method) 공법으로 설계되었으나, ILM공법으로 설계 변경하여 시공되었다. 이후로 표 3.5와 같이 고속도로와 지방도 및 국도상의 많은 교량이 ILM 공법으로 가설되었다. 한강의 서강대교와 행주대교, 낙동강의 구포교 등의 가설에 ILM 공법이 적용되었고 포스코 광양제철소에 진입하는 철도교를 경간 40m 연속박스거더교로 설계하여 ILM 공법으로 가설한 실적이 있다. 1988년부터는 압출 잭(launching jack)도 개발하여 국산화에 성공하였다.

공주에 1986년도에 준공한 공주대교는 PSC 연속박스거더교이다. 경간길이가 60m이고 변단면이며, 금강을 횡단하는 이 교량이 FSM(full staging method) 공법으로 가설되었다. 그 외에도 여러 교량이 FSM공법으로 가설되었다. 우리나라와 같이 여름철 우기에 강우가 집중하여 홍수를 겪어야 하는 하천에서 FSM 공법을 적용하는 것은 위험소지가 많아 채택을 꺼리고 있는 형편이다.

'88서울올림픽개회를 준비하면서, 서울시는 도시정비와 도로정비 및 확충을 서둘렀다. 이 과정에서 올림픽상징물인 올림픽대교를 현상공모를 통해 건설하게 되었고, 김포공항에서 잠실주경기장을 거쳐 강동에 이르는 한강남측강변로(일명 올림픽대로)를 대폭 확장 정비하였다.

한강대교와 동작대교 사이에는 고가교량(노량대교)으로 처리하였는데, 그 구조는 PSC 연속박스거더교(1실)이며 이 교량을 국내에서는 처음으로 MSS(moveable scaffolding system)공법으로 가설하여 1984년에 준공하였다. 그리고 노량대교의 확장공사 역시 전기공법으로 1994년도에 준공하였다. 그 외에 강변교(경간 50m, 연장 1,000m)를 1988년도에 준공하였고, 김포대교의 진입교량의 가설에도 MSS공법을 적용한 바가 있다.

1998년 말경에 개통한 서울시의 내부순환도시고속도로, 그 중에서 정릉천변고가교를 MSS공법으로 박스주형을 먼저 가설하였다. 경간 60m 전후인 연속박스거더교의 박스주형의 폭은 12m, 거더높이 4m, 전체 폭은 27m이다. 우선 박스주형을 MSS공법으로 가설한 후, 프리캐스트판넬을 복부 외측에 설치한 후 잔여 바닥판슬래브를 시공한 신공법이었다. 현재 표 3.7과 같이 많은 PSC 연속박스거더교가 MSS공법으로 시공되었고, 최근에는 경부고속철도 상의 많은 고가교량도 MSS공법으로 건설되고 있다.

동아건설산업(주)의 기술진이 원효대교를 건설한 경험을 살려, 충주댐 이설도로상에 있는 원효대교의 구조형식과 거의 같은 청풍교와 상진교를 FCM공법으로 가설하였고, 전북 임실에 있는 운암호 상류를 횡단하는

표 3.7 MSS공법으로 건설된 연속PSC 박스거더교

| 교 량 명 | 총연장 (m) | 최대지간 (m) | 교폭 (m) | 발주처 | 착공 연도 | 준공 연도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 노량대교(구) | 1,350 | 50 | 21.4 | 서울시 | 1983 | 1987 |
| 강변교 | 1,000 | 50 | 11.0 | 원주청 | 1986 | 1988 |
| 노량대교(신) | 1,350 | 50 | 21.4 | 서울시 | 1987 | 1993 |

운암교(27번국도상에 있음)를 FCM공법으로 가설하였는데, 이 경우에도 원효대교와 유사한 힌지부의 처짐 때문에 논란의 대상이 된 교량이다. 이 당시까지는 PS 긴장재를 강봉으로 하였고, 강봉과 앵커는 전량 수입되었다. 구조형식도 경간 중앙에 힌지를 설치한 3경간 라멘형이었다. 이후부터 FCM공법에 의하여 많은 연속 PSC 박스거더교가 건설되고 있으나 원효대교와 이들 교량의 처짐문제의 경험을 바탕으로 힌지가 없는 연속 박스구조로 건설되고있다.

1992년에 준공한 강동대교와 1994년에 준공한 삼호교는 PSC 연속박스거더교로 FCM공법으로 가설되었다. PS 긴장재는 Φ12.7 강연선의 국산재료를 사용하였고, 긴장재의 프리스트레싱표 작성과 시공캠버도 작성은 V.S.L Korea 기술진과 STRONGHOLD사의 국내기술진의 도움을 받았다. '88서울올림픽개최를 기념하는 상징물로 1989년 말 개통된 올림픽대교는 사장교 구간의 상부구조가 PSC 연속박스거더인데 FCM공법으로 가설되었다.

최근에 개통한 안양고가교와 영동고속도로상에 있는 경간길이 160m의 연속PSC 라멘교의 횡성대교의 건설에는 FCM공법을 적용하였는데, 이 때부터 교각구체를 쌍둥이 기둥(twin-column)으로 설계하기 시작하였다.

2000년 11월에 준공된 서해고속도로상에 아산만을 횡단하는 서해대교 중에서 FCM공법으로 경간 165m의 PSC 박스 라멘교(그림 3.8)가 건설되었고, 춘천시에서 발주한 신매대교와 인천시에서 건설하는 강화2교는 FCM공법으로 건설되었다.

현재 건설 중에 있는 전주-함양간 고속도로 노선 상에 있는 신촌교는 경간길이 170m, 전체 연장 1,060m인 7경간 연속박스거더 라멘교이다. 이 교량이 완성되면, 우리나라에서 FCM공법으로 가설한 교량 중 가장 긴 경간의 다리가 될 것이다. FCM공법으로 건설된 PSC박스거더교는 표 3.8과 같다.

서울시에서 내부순환도시고속도로를 건설하면서, 강변북로와 내부순환도의 고가교는 PSM(precast segmental method)공법으로 가설하였는데, 경간길이 50m의 연속박스거더교이다. 서울과 분당신도시를 연결하는 분당선의 일부 고가교에도 PSM공법을 적용하였

표 3.8 FCM공법으로 가설된 교량

| 교 량 명 | 연장(m) | 경간(m) | 교폭(m) | 발 주 처 | 착공연도 | 준공연도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 원효대교 | 1,470 | 100 | 20 | 서울시 | 1978 | 1981 |
| 상진교 | 400 | 95 | 12.5 | 건교부대전청 | 1983 | 1985 |
| 청풍교 | 315 | 100 | 10 | 건교부대전청 | 1983 | 1985 |
| 운암교 | 350 | 160 | 10 | 건교부익산청 | 1984 | 1989 |
| 올림픽대교 | 1,440 | 300 | 30 | 서울시 | 1985 | 1989 |
| 강동교 | 1,126 | 120 | 26.7 | 한국도로공사 | 1988 | 1992 |
| 가화천교 | 290 | 60 | 23.9 | 한국도로공사 | 1990 | 1992 |
| 삼호교 | 458 | 64 | 17.5 | 울산시 | 1991 | 1994 |
| 나로도 연륙교 | 360 | 160 | 10 | 건교부익산청 | 1991 | 1995 |
| 비금도 연륙교 | 812 | 128 | 8.2 | 건교부익산청 | 1991 | 1995 |
| 자은-암태 연륙교 | 675 | 105 | 9.0 | 건교부익산청 | 1992 | 1996 |
| 안양고가교 | 530 | 160 | 38.7 | 한국도로공사 | 1992 | 1996 |
| 김포대교 | 2,280 | 125 | 37.8 | 한국도로공사 | 1992 | 1997 |
| 신매대교 | 660 | 80 | 21 | 춘천시 | 1995 | 2000 |
| 강화2교 | 1,000 | 120 | 4차선 | 인천시 | 1996 | 공사중 |

그림 3.8 서해대교

고, 서해고속도로 노선 상에 있는 서해대교의 상당부분이 PSM공법으로 가설되었다(그림 3.8). 이로 말미암아, 비부착 외부케이블(external tendon)의 사용이 일반화되었으며, 사용된 PS 긴장재는 Ø12.7 스트랜드이다. 국내에서 PSM공법으로 건설된 연속PSC 박스거더교의 현황은 표 3.9와 같다.

경부고속철도상의 고가교는 대부분 PSC 박스거더형으로 설계되었고, FSM 또는 MSS 공법을 이용하여 가설되고 있다. 그런데, 8-2공구에서는 PSSM(precast span by span method - 이공법을 PSM공법이라고 명명하고 있는데 앞의 PSM(precast segmental method)과 약자가 동일하여 혼돈되므로 여기에서는 편의상 PSSM공법이라 표기함) 공법으로 25m짜리 박스거더를 통째로 공장 제작하여 트로리로 운반, 한 스팬씩 거치하는 것으로 9km에 이르는 고가교가 건설되고 있다.

### 3.3.4 PSC 사장교

(1) 개 요

PSC 사장교는 일반적으로 상부구조를 PSC 거더나 강재거더, 주탑은 철근콘크리트 구조, 강재 사재로 조합한 교량을 총칭한다. PSC 사장교는 PSC 거더교에 비하여 거더높이를 낮출 수 있고 미적으로 우수하기 때문에 최근에 많이 건설되고 있는 교량형식이다. 지금까지 건설된 국내외의 주요 PSC 사장교의 현황을 수록하면 표 3.10과 같다.

(2) 올림픽대교

강동지역의 교통량 증가에 대비하고 서울올림픽을 기념할 수 있는 수준 높은 교량의 건설을 구상하게 되었다. 교량형식 선정배경은 현상 공모된 작품 중 당선작을 택하였으며, 선정 및 구상의 의미는 날로 신장하는 국력을 과시하기 위해 세계적으로 많이 채택되고 있는 단면 방사형 콘크리트 사장교로 선정하고, 탑의 구성은 4주(柱)로 하여 동방철학에서 우주만물의 근원으로 상징되는 연, 월, 일, 시와 4계절 춘, 하, 추, 동 및 4방향 동, 서, 남, 북을 나타내도록 하였다.

한편 제24회 올림픽을 기념하여 케이블의 수를 24개, 주탑의 높이는 1988년의 기념하기 위하여 88m로 취하였다. 구조형식은 유심부가 PSC사장교이고, 기타 구간은 다경간 연속 PSC박스거더교로 구성되어 있으며, 교폭은 30m, 교장은 1,470m이다.

가설공법은 상부거더의 가설에는 사장교구간에 FCM(free cantilever method), 연속교구간은 이동

표 3.9 PSM공법으로 가설된 교량

| 교 량 명 | 연장(m) | 경간(m) | 교폭(m) | 발 주 처 | 착공연도 | 준공연도 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 강변북로도시고속 | 3,670 | 50 | 17.4 | 서울시 | 1989 | 1994 |
| 강북도시고속도로 | 5,020 | 50 | 26 | 서울시 | 1990 | 1994 |
| 강변북로 (당산~한강) | 3,300 | 50 | 25.9 | 서울시 | 1992 | 1995 |
| 부산항고가교 | 3,000 | 50 | 22 | 항만청 | 1992 | 1996 |
| 정능천 1공구 도시고속도로 | 1,800 | 50 | 27 | 서울시 | 1992 | 1996 |
| 서해대교 | 5,820 | 60 | 31.4 | 한국도로공사 | 1993 | 2000 |

식공법(movable scaffolding method)이 사용되었고, 가설장비로는 이동식 거푸집틀(form traveller)을 사용하였고 세그먼트의 길이는 5m이었다. 또한 올림픽대교의 미관은 그림 3.9와 같이 콘크리트재료 사용으로 중후감 있는 미관 및 형하공간(桁下空間)의 시원한 공간미와 직선미를 구성하고, 종단곡선 삽입으로 곡선미도 가미하였다. 시공 도중 발주자, 설계자, 감리자, 시공자간에 많은 논쟁이 발생하여 88서울올림픽경기가 끝난 후인 1989년에 준공되는 산고를 겪었다.

그림 3.9 올림픽대교

올림픽대교는 국내에서 처음 건설하는 사장교였기 때문에 품질관리에 역점을 두었었고, 준공전에 국내에서는 처음으로 계측기를 설치하기로 하였으나 계측관리 경험 부족으로 실패하였다. 그러나 성수대교의 붕괴 후 오스트리아 VEC사와 시공에 참여했던 유원건설의 모회사인 (주)한보가 서울시로부터 유지관리계측 업무를 공동수주하여 장기계측관리를 수행하고 있는 상태이나 분석의 효율을 위해 현재는 시설안전관리공단이 추가로 분석과 유지관리를 주도하고 있다.

(3) 신행주대교

신행주대교 가설공사는 국도 29호선(부여~의정부간) 중 서울특별시 강서구 개화동과 경기도 고양시 신행주동까지 시설 교량을 가설하는 사업으로, 기존 행주대교의 교량폭이 협소하고 날로 증가하는 교통량으로 차량통행에 막대한 지장을 초래하고 있어, 그 지역의 교통정체의 해소와 교통흐름의 원활을 기하고자 기존 교량 하류 측에 신공법을 도입하여 미려한 장경간 교량을 신설하기 위해 건설부 서울지방구토관리청은 교량구간을 대안 입찰로 발주하였다.

신행주대교의 교장은 1,460m, 교폭은 14.5m(3차로)이고, 사장교구간은 380m(160+120+100m), PSC BOX거더교(ILM) 구간은 1,030m, 강박스거더교(군거부시설) 구간은 50m이고, 사장교 주탑은 2기이며, 교각은 중공식 RC교각이고, 기초에는 우물통기초와 현장타설 콘크리트 말뚝기초가 적용되었다.

벽산건설 주식회사가 대안으로 입찰한 현장타설 말뚝인 바렛 말뚝(barrette pile) 기초공법과 상부공 PSC 거더를 ILM 공법으로 가설하는 특수한 여건의 사장교로 대안이 채택되었다. 1992년 7월말 공사 중이던 신행주대교의 사장교구간 전구간이 붕괴되면서, 사장교 중앙경간의 중앙 가교각(TP4)을 중심으로 북쪽구간은 가교각을 향해 남쪽으로 23m, 남측구간은 가교각을 향해 16m가 이동하면서 완전 붕괴되었다. 붕괴는 프리캐스트로 구성되었던 가교각의 안정성 상실과 ILM 구간 상부구조의 시공이음부의 안전성 결여가 조합하여

표 3.10 국내외의 주요 PSC 사장교

| 교 명 | 국명 | 주경간장(m) | 준공연도 | 상부구조 | 주탑 | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Main II교 | 독일 | 148 | 1972 | 콘크리트 | RC | 첫 콘크리트 사장교 |
| Brotonne교 | 프랑스 | 320 | 1977 | 〃 | RC | |
| Pasco-Kennewick교 | 미국 | 299 | 1978 | 〃 | RC | |
| Barrios de Luna교 | 스페인 | 440 | 1983 | 〃 | RC | |
| Da Annacis | 캐나다 | 395 | 1986 | 합성거더 | RC | 첫 합성거더 |
| 올림픽대교 | 한국 | 150 | 1989 | 콘크리트 | RC | |
| Normandy교 | 프랑스 | 856 | 1994 | Hybrid | RC | 중앙경간 : 강재<br>측경간 : 콘크리트 |
| 신행주대교 | 한국 | 120 | 1995 | 합성거더 | RC | |
| 서해대교 | 한국 | 470 | 2000 | 합성거더 | RC | |

발생되었다.

1992년 11월 30일부터 벽산건설측의 복구공사비 부담으로 복구공사가 재 착공되었으며 (주)벽산엔지니어링이 미국의 DRC Consultant Inc.의 도움을 얻어 복구공사 설계 업무를 담당하였다. 복구공사에 대한 설계는 당초의 설계를 토대로 하여 조사자료 및 조사내용을 참고하여 교량구조의 안전성과 내구성을 높이고 시공성과 공기단축 및 전체교량의 미관 등이 고려되었다. 공사감리는 (주)유신 코퍼레이션이 담당하여 1995년 5월 19일 개통되었다.

이 교량은 시공중 붕괴되었던 교량이기 때문에 시공중에는 사장교구간에 대하여 주탑, 상부구조, 케이블 등에 경사계, 가속도계, 응력계, 변위계, 온도계, 풍향풍속계등을 설치하여 시공중 계측관리시스템을 운영하였고, ILM구간에는 상부구조본체, 교각, 압출 노우즈(nose) 등에 변형률게이지와 경사계를 설치 운영하여 안전한 시공을 수행하였고, 공용 전에는 재하시험을 통하여 안전성과 공용내하력을 확인하였다. 한편 사용중의 안전과 유지관리를 위한 매뉴얼을 만들어 유지관리에 활용하고 있다.

### 3.3.5 PSC 슬래브교와 PSC 라멘교

경상북도 김천시 동쪽의 낙동강지류를 횡단하는 김천교가 1984년도에 경간장 20m 전후의 PSC 연속슬래브교(FSM공법)의 건설을 기점으로 하여, 경부고속도로와 호남고속도로의 횡단교량이 3경간 연속교의 PSC 상부슬래브 단부와 교각기초를 PS강재로 연결한 PSC 라멘구조로 건설되기 시작했다.

국내에 건설된 PSC 라멘교 중 가장 경간장이 긴 것은 서해대교의 남측부에 위치한 길이 500m의 4경간 연속 PSC 라멘교이다.

이 교량은 85m+165m+165m +85m의 4경간으로 구성된 것으로서 LG 건설에 의해 건설되었으나, 원설계의 최대경간장의 200m가 시공성 때문에 165m로 줄여 시공된 것은 매우 아쉬운 점이다. 만일 200m로 시공하였다면 당시의 세계 1,2 위의 장경간 PSC 라멘교로 기록될 수 있었을 것이다.

## 3.4 경부고속철도의 콘크리트교

### 3.4.1 고속철도 기술의 발전과 콘크리트교

1964년 10월 세계 최초로 일본의 도쿄와 오사카를 연결하는 515.4km의 고속철도가 개통된 이래 1981년 9월에 프랑스의 TGV, 1991년 5월에 독일의 ICE등이 개통되면서 고속철도의 시대가 도래하였다. 현재 일본에는 총 연장 1900여km, 운행최고속도 210~260 km/hr의 신간선, 프랑스에는 총 연장 1300여km, 최고운행속도 270~320km/hr의 TGV, 독일에는 총 연장 427km, 최고운행속도 250km/hr의 ICE가 운영되고 있다.

한편 우리 나라에서는 1983년 3월부터 1985년 9월 사이의 고속철도건설 타당성조사를 통하여 경부선이 경제성과 기술성 면에서 고속철도에 적합하다는 결론을 토대로 1989년 12월 경부고속철도건설을 추진하기로 하였으나 외국에 비하여 준비기간이 짧았고 기술력이 미약한 상황에서 국민, 언론, 정계의 공감대를 도출해 내지 못하여, 초기단계에서부터 많은 논란의 여지를 가지고 출발되었다.

1989년 9월부터 1991년 1월까지 기술적인 기초조사를 수행하였고, 1990년 11월부터 1992년 5월 사이에 UIC기준과 일본의 고속철도기준을 근거로 한국형 고속철도의 설계기준, 공사시방서, 표준도 등의 제기준을 작성하였으며, 또한 차량형식도 정해지기전, 기준 작성중에 1991년 6월부터 1994년 12월 사이에 고속철도 노반시설의 실시설계가 진행되었고, 한편 1992년 6월에는 천안~대전구간의 시험선 공사가 착공되고, 고속철도열차는 1994년 6월에 TGV로 결정되면서 구매계약이 이루어졌다.

고속철도에 관한 경험과 정보가 부족했던 전문가들은 경제적 건설문제, 진동과 처짐의 기술적 문제, 건설후의 유지관리문제, 일본, 프랑스, 독일의 사례에 근거하여 고속철도상의 교량중 대부분을 PSC거더교, RC라멘교로 선정하게 되었고, 고속도로 횡단구간에만 일부

강합성교와 강아치교 형식이 도입되었다. 그러나 타당성조사, 기초조사, 제기준 등의 준비기간이 부족했고, 이런 상황하에서 실시설계와 건설공사가 추진되었기 때문에 많은 시행착오를 겪으며 국민적 논란이 끊이지 않았고, 드디어 1997년 9월부터는 사업추진방안을 원점에서부터 재검토하여 1999년도에 현재의 추진계획안이 확정되기에 이르렀다.

### 3.4.2 고속철도 교량의 설계기준과 구조형식

(1) 교량설계기준

경부고속철도의 건설기준에 따라 고속철도 차량의 특성과 우리나라 지형특성 등 실정에 적합하고 철도선진국에서 공통으로 적용하고 있는 국제철도연맹(UIC : International Union of Railway Code) 기준과 지진시 안전 등을 생각하여 기술적인 연계성과 안정성을 보장할 수 있는 시스템엔지니어링 방식에 의해 설정하였다.

기존 철도와 서로 연결운행을 생각하여 디젤기관차도 주행 가능한 교량구조로 설정하였으며, 장래 남북철도 및 중국철도 등 유라시아 철도와 직결운행이 가능하고 세계각국의 고속철도 기술발전 추세를 생각하여 장차 속도향상할 수 있는 구조로 교량설계기준을 정하였다.

설정한 설계기준은 열차운행 최고속도 300km/h, 설계속도 350km/h, 열차운행 시격은 설계 3분, 운용 4분, 선로궤간 1,435mm(표준궤간), 선로중심간격 5.0m, 교량폭 14.0m, 설계표준하중은 UIC하중(UIC-code 702), 콘크리트 설계강도는 PSC-상부구조 400 kgf/㎠, 하부구조 240kgf/㎠, 라멘교량 240kgf/㎠, 차량한계는 최대폭 3,400mm, 최대높이 4,800mm, 팬타그라프를 높였을 때의 최대높이 6,000mm, 전기급전방식 AC 25kv, 1개 열차길이 400m, 1개 열차 승차인원 1,000명 내외, 레일 60kg/m, 침목은 PSC 콘크리트, 도상은 자갈 또는 슬래브콘크리트, 도상두께 35cm이상 (침목하단에 시공기면까지) 등으로 각각 결정되었다.

(2) 고속철도교량의 구조형식과 설계

고속철도교량은 궤도구조, 장대레일, 비상시 기존철도와의 연계성, 남북철도의 연결, 유라시아 철도와의 연결, 유지관리 등을 고려하여 상부구조는 단순 PSC 거더교, 라멘교 형식(시공기면높이가 10m미만인 경우와 정거장), 하부구조는 중공식 교대와 교각, 기초구조는 우물통(하천), 직접기초(암반지반), 강관말뚝기초(암반깊이가 10m이상인 경우), 현장타설콘크리트 말뚝기초(민원예상지역)형식이 채택되었다. 채택된 설계기준과 선정된 구조형식을 중심으로 1991년 6월부터 1994년 12월까지 1단계 설계가 수행되었고, 이 설계결과를 기초로 공사가 추진되었으나, 고속철도의 특성을 감안한 설계성과품의 기술적 안전성 검토의 필요성이 대두되어 1993년 9월부터 1997년 5월까지 3단계 기술적 평가 및 분석이 이루어졌다.

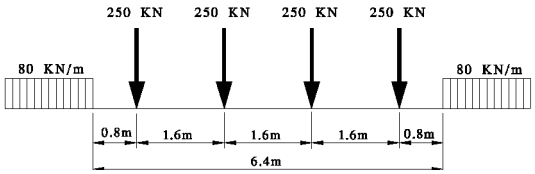

그림 3.10 고속철도 교량의 설계 표준하중 (UIC-Code 702)

제1단계에서는 국내 14개 엔지니어링사의 전문가와 Louis Berger에 의하여 차량-노반시설의 상관관계 분석, 제2단계(1993.9~1995.6)에서는 미국 버클리대학의 Joseph Fenzien 교수에 의해 교량의 동적거동과 안전성, 영국 던디대학의 Alan Vardy에 의해 터널의 동적거동과 안전성분석, 제3단계에서는 프랑스 SNCF의 SYSTRA 기술팀에 의하여 교량설계기준, 차량-노반시설의 상관관계, 실시설계내용, 교량시공 상세도, 시험선 구간의 시험결과에 따른 교량의 거동과 설계시공 내용의 검증작업이 수행되었다.

3단계의 검증을 통하여 기 시공된 라멘교의 슬래브와 기둥의 보강필요성과 RC 라멘구조형의 역사건물은 열차 진동저감대책의 필요성이 대두되었고, 단순 PSC 거더교는 2경간내지 3경간 PSC 박스거더로 상부구조의 형식이 바뀌게 되었고, 보강철근 밀집구간의 구조상세가 보완되었고, 교량의 부속시설(받침부, 신축이음, 방수시스템, 방음벽, 전차선 기초등)이 보완되었다. 결국 교량상부구조는 지간장 25m내의 3경간 연속 PSC 박스거더교와 RC 라멘교를 표준으로 하고, 필요한 구

간에는 지간장 40m의 2경간 연속 PSC 박스거더교를 적용하게 되었다(그림 3.11, 3.12). 한편 고속도로나 기존철도를 횡단하는 구간에는 강-콘크리트 합성교나 강아치교와 같은 특수교량을 적용하였다.

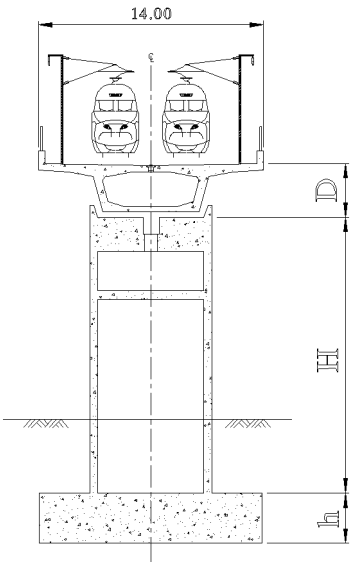


그림 3.11 PSC 박스 교량 표준단면

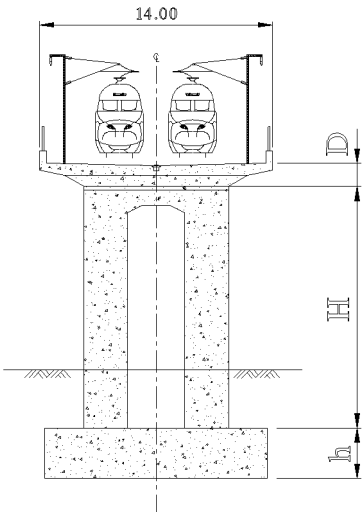


그림 3.12 라멘 교량 표준단면

### 3.4.3 교량설계

(1) 설계의 특성

경부고속철도의 교량설계는 설계속도 350km/h를 감안한 열차제동에 의한 충격과 지진에 대하여 안전한 구조로 설계해야 하고, 완벽한 시공으로 품질관리가 확보되어야하며, 가능한 국산재료를 최대한 활용하도록 하고, 선진국에서 사용하고 있는 특수한 재료를 국산화되도록 설계하며, 기초의 소요지지력을 확보하도록 설계하였다.

고속철도의 동적거동의 특성상 연속교량구조로 설계해야하나 교량상부구조와 궤도구조의 온도신축에 따른 기술적인 연계성을 생각한 장대레일조건에 적합하게 설계해야하므로 교량상부구조의 연속길이가 제한되어 PSC 박스 경간 40m는 2경간 연속(2@40m), 경간 25m는 3경간 연속(3@25m)으로 설계하고, 하부구조의 부등침하는 연속구조인 상부구조에 치명적인 영향이 미치므로 기초에 부등침하가 발생하지 않도록 설계하여 정밀시공을 요구하였다.

일반철도나 고속도로에서는 시속 150m 이하로 주행하기 때문에 구조물에 열차나 자동차 하중으로 인한 진동주기와 구조물의 고유진동주기가 같을 때 발생하는 공진현상 가능성이 적으나, 고속철도에서는 시속 약 260km 이상은 공진현상이 발생하여 상부구조물의 처짐과 휨모멘트 작용이 증가되므로 이에 따른 안전한 설계와 정밀시공을 요구하였다.

하부구조는 시험선에서 하천구간은 원형교각, 기타구간은 구형교각으로 설계하여 시공하였으나, 공기 등 시공효율을 증대하기 위해 하천 아닌 구간에도 수직원형교각과 수직구형교각으로 보완 설계하였다.

교량기초설계는 큰 하천은 대구경말뚝 기초공법과 철근콘크리트 우물통 기초공법을 비교한 결과 경제성면에서 차이가 많아 우물통 기초로 설계하였으며, 하천구간이 아닌 구간 기초지반이 암반인 구간은 직접기초로 하고 그렇지 않는 구간은 말뚝기초로 하였으나 정밀시공과 품질관리면에서 강관말뚝기초로 설계하였으며, 주거지역 등 말뚝박기에 대한 소음 진동 민원구간은 현장타설 콘크리트 말뚝기초로 설계하였다.

(2) PSC 박스 상부구조 표준화 설계

PSC 박스 교량은 연장 99.8km나 되는 많은 물량이므로 교량경간과 시공법, 경제성, 보수유지관리 등을 생각하여 PSC 박스 상부구조의 15개에 대하여 형식표준화 설계를 하였다.

표 3.11 특수교량형식 및 시공법

| 교 량 명 | 연장(m) | 특 수 교 량 | | | 시 공 법 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 연장(m) | 상부구조형식 | 경 간 | |
| 팔곡고가 | 1,160 | 120 | PSC 박스 | 2@30m×2 | M.S.S |
| 매 송 교 | 180 | 100 | PSC 박스 | 2@50m | F.S.M |
| 평택교가 | 6,291 | 116 | PSC 박스 | 33+50+33 | F.S.M |
| 배 방 교 | 874 | 480 | PSC 박스 | 12@40m | M.S.S |
| 연 제 교 | 1,920 | 560 | PSC 박스 | 7@40m | F.S.M |
| 오 송 교 | 2,280 | 600 | PSC 박스 | 7@40m×2<br>8@40m×1 | F.S.M<br>F.S.M |
| 갈 원 교 | 400 | 280 | PSC 박스 | 3@40m×2<br>8@40m×1 | M.S.S<br>M.S.S |
| 금 강 교 | 1,640 | 160 | PSC 박스 | 47+70+45 | F.S.M |
| 갑 천 교 | 2,895 | 200 | PSC 박스 | 55+90+55 | F.C.M |
| 언양고가 | 768 | 158 | PSC 박스 | 46m+68m+45m | F.C.M |
| 송정고가 | 1,954 | 108 | PSC 박스 | 28m+52m+28m | M.S.S |
| 노포고가 | 280 | 280 | PSC 박스 | 41m+3@66m+41m | F.C.M |

천안~대전간 시험선구간은 2@25m Multi, 3@25m Multi, 3@25m MSS(H=2.4m), 3@25m FSM (H=2.4m), 7@40m FSM, 8@40m FSM, 12@40m MSS 등 7개 형식으로 설계하고 시험선 이외 구간은 1@40m MSS, 1@40m FSM, 2@40m MSS, 2@40m FSM, 2@25m MSS, 2@25m FSM, 3@25m MSS(H=2.7m), 3@25m FSM (H=2.7m) 등 8개 형식으로 모두 15개 형식으로 설계하여 현장조건에 적정하게 선정 설계하였다.

위에서 H=2.4m와 2.7m는 시험선 구간에서 예산절감을 위해 PSC보 구조로 설계하였으나. 동특성 검토결과 PSC 박스 구조로 보완하게 되어 H=2.4m로 설계하였으며, 그러하지 않는 구간의 적용을 위해 시공성을 생각하여 H=2.7m로 설계하였다.

(3) 특수교량설계

고속철도가 고속도로와 국도, 기존철도와 횡단하는 개소는 교차하는 방향과 조건에 따라 교량경간이 다르고 현장조건에 적합한 구조로 설계해야 하기 때문에 그 횡단개소의 교량만 3@25m, 2@25m, 2@40m의 표준형 외의 형식과 강합성 등 다음과 같은 특수교량형식으로 설계하여 시공하였다.

## 3.5 콘크리트교의 붕괴사고

### 3.5.1 콘크리트교의 붕괴 사례

국내에서 발생한 콘크리트교의 붕괴 사례를 정리하면 표 3.12와 같다.

창선교는 시공과 관련된 우물통의 안정성 결여로 붕괴되었고, 추자교는 통행 제한하중을 초과하는 공사용 과적차량의 통과로 붕괴되었다.

한편 팔당대교와 신행주대교는 둘 다 콘크리트 사장교로서 상부구조의 시공중에 붕괴되었다. PSC 연속교와 PSC 사장교는 시공중에 가장 위험한 상황을 만날 수 있고, 준공 후에는 큰 문제가 발생하지 않는 경우가 일반적이다.

준공직후에 붕괴된 제주도 천지연 현수교(강교) 붕괴(1981.12)와 사용중의 성수대교(강트러스교) 붕괴와 함께 일련의 교량 붕괴사고는 국가와 사회와 모든 시민들에게 엄청난 충격과 불안을 주었고, 사회기반시설과 건설분야의 신뢰도에 의문을 던지는 계기가 되었다.

이러한 전철을 다시 밟지 않기 위하여 교량 붕괴의 원인과 교훈이 기술자에게 주는 교훈이 무엇인가를 팔당대교와 신행주대교를 중심으로 조사 보고서에 근거하여 기술하고자 한다.

### 3.5.2 팔당대교의 붕괴

(1) 사고당일의 풍속

1991년 3월 26일 이른 아침에 붕괴된 팔당대교의 가설위치는 지형특성, 기상특성 때문에 오전 중에 서울의 평균풍속보다 훨씬 강한 돌풍이 발생할 가능성이 있는 지역으로서, 사고당일 교량에는 최소한 32m/sec 이상의 예기치 못했던 강풍이 있었던 것으로 추정되었고, 동바리 트러스구조의 설계시에는 평균설계풍속을 사용하지 않고, 20m/sec의 풍속을 적용하였는데, 실제로는 풍속 20m/sec를 초과하는 예기치 못했던 국소적인 강한 돌풍(gust)이 작용하여 교량을 붕괴에 이르게 한 것으로 사료된다.

만일 현장에 시공중 현장풍속을 측정할 수 있는 계측기가 있었더라면 관리에 효과적으로 사용되었을 것으로 판단되었다.

표 3.12 콘크리트교의 붕괴 사례

| 교량명 | 교량형식 | 사고일자 | 사고 상황 |
|---|---|---|---|
| 팔당대교 | PSC사장교 | 1991.3.26 | 공사중 사장교구간 340m 붕괴 |
| 창선교 | PSC I형 거더교 | 1992.7.30 | 사용중 하부구조 붕괴 |
| 신행주대교 | PSC사장교 | 1992.7.31 | 공사중 사장교구간 380m 붕괴 |
| 추자교 | PSC I형 거더교 | 1993.1 | 사용중 1경간 붕괴 |

(2) 설계조건

동바리구조(가설벤트와 가설트러스)의 설계에서 상부구조의 하중을 동바리 기둥에 균등하게 분포시킨 것은 실제의 거동과 차이가 있고 이로 인하여 벤트의 기둥과 기초 연결부 및 브레이싱 연결부에 큰 응력이 작용하는 곳이 있었다고 사료되고, 경험자료, 경제적 시공을 기초로 하여 설계 풍하중을 20m/sec로 정한 것은 다소 낮게 적용한 것으로 판단되는데, 실제로는 시공당일 32m/sec 이상의 강한 돌풍이 작용한 것이 붕괴에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다.

또한 동바리 구조시스템을 고려할 때, 벤트와 벤트 사이에 브레이싱이 없기 때문에 만일 바람에 의하여 매스(mass)를 가지고 있는 한 경간이 붕괴되면 시공중의 타구간이 연쇄적으로 붕괴할 수 있는 구조였다고 판단되었다.

(3) 현장조사

동바리구조(벤트와 가설 트러스)와 상부구조 사이를 시공중에 긴결한다는 것은 시공상 매우 어렵지만, 이 현장에서는 연결 장치가 없었고, 가설 트러스의 조립에서는 고장력볼트를 사용하였으나 가벤트, 기초 등의 연결부에는 보통연강볼트를 사용하였는데 고장력볼트를 사용하는 것이 적절했을 것으로 사료되었다.

(4) 상부구조의 거동해석

상부구조와 동바리가 일체로 거동하지 않을 경우 동바리의 설계풍속인 20m/sec 정도의 풍속에서도 기시공된 매스 분포로는 상부구조에 양압력이 발생하여 상부구조가 위로 떳다가 내려앉을 때 동바리에 충격을 줄 수 있다고 사료되었다.

상부구조는 주탑과 별개로 시공중이었기 때문에 상부구조의 붕괴가 주탑에는 별 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다.

(5) 동바리구조의 비선형해석

본 동바리구조는 변형이 크게 발생할 수 있는 구조로서 비선형해석이 필요하고, 기초와 벤트의 연결부, 벤트 브레이싱의 연결부에 있는 연결볼트의 응력이 32m/s의 풍속에 대하여 허용치와 파괴치를 초과하는 것이 있었고, 이로 인하여 주부재의 파괴 이전에 연결볼트의 파괴에 의하여 붕괴되었을 가능성이 높다고 판단되었다.

(6) 시공상의 문제

팔당댐 하류 4km 지점에 위치한 팔당대교 현장의 지형적 특성으로 인하여 한 건기내에 공사를 완료해야 하는 공기문제 때문에 상부구조를 다발적으로 시행하므로 상부구조의 매스 분포가 균일하지 않았고, 기초부와 벤트의 연결이 설계상의 고정단이 아니라 고정과 힌지의 중간 정도에 해당하여, 설계상의 거동과 실제의 거

동 사이에 차이가 생겼다고 사료되고, 상부구조의 시공 중 상부구조의 양압력 및 횡방향 변위를 구속할 수 있는 장치가 없었던 것들이 붕괴의 원인으로 작용하였다고 판단되었다.

(7) 대책방안

사장교구간의 상부구조가 붕괴된 후 주탑을 면밀히 조사하였을 때 너무 많은 수화열 및 건조수축 균열이 발견되어 팔당대교는 사장교가 아닌 완전히 다른 강교로 새로 건설되어 현재 사용되고 있다.

### 3.5.3 신행주대교의 붕괴

1992년 7월 31일 18시 59분에 발생한 붕괴 전후의 신행주대교의 상황은 그림 3.13과 같이 교각의 일부와 상부구조 전체가 붕괴되었다.

신행주대교의 붕괴는 어느 한순간의 돌발사고가 아니라, 간접적인 원인과 직접적인 원인이 함께 누적되어 발생한 진행성 파괴라고 결론지을 수 있었다.

그림 3.13 붕괴 전후의 신행주대교

간접적인 원인으로는, 부적절한 사장교의 경간분할과 사장재공법의 선택, 사장교구간과 인접연속교구간의 무리한 연계시공, 유수가 있는 하천교각 기초로 바렛 말뚝의 무리한 채택, 두 주탑사이의 가교각의 위치와 수의 부적절, 시공중 계측관리의 미비, 콘크리트사장재의 시공전에 두 주탑 사이에 있는 가교각 TP4(기초와 교각구체)와 가로보 사이의 상부구조(가로보연결부와 시공이음부)의 안전도 검사소홀, 본교량의 설계에 별개의 2 기관(상하부 설계기관과 사장재 설계기관의 다름)으로 인한 연계성부족, 본 공사에 참여한 시공자, 설계자, 감독자의 빈번한 교체와 공사전반에 대한 충분한 이해부족등이 관련되어 있었다.

한편 직접적인 교량붕괴는 두 주탑 사이의 중간부분에서 제일 먼저 발생하였고, 이로 인하여 전 교량이 연쇄적으로 붕괴된 것으로 추정된다. 구체적으로 표현하면 붕괴는 중앙가교각(TP4)과 남측(김포측)의 가로보 사이 중간점에 위치한 시공이음부의 전단슬립, 가교각 구체의 결함과 수평력에 의하여 가교각 위에 작용한 과다 연직하중의 편심재하가 연계하여 발생한 것으로 추정되었다.

파괴직전까지 시공이음부의 파괴안전율은 1.13이었고, 가교각의 파괴안전율은 1.16으로 추정되었다. 시공이음부의 파괴안전율은 신구 콘크리트 사이의 이음부 시공이 완전치 못하여 전단마찰에 의한 전단전달을 기준으로 해석되었고, 가교각의 파괴안전율은 상부구조의 압출과 관련있는 가교각 받침부의 마찰력 증가와 가교각의 횡방향 영구변형, 가교각 구체의 낮은 강도 및 세그먼트 사이의 점진적인 상대밀림 등을 기준으로 해석된 것이다.

이와 같이 파괴안전율이 낮아진 것은 주로 부정확한 시공, 가교각 구체재료의 강도부족, 과대한 가설하중, 상부구조의 불완전한 시공이음부 처리, 가교각 구조의 모순(전단 Key가 없는 세그먼트, 프리스트레스를 받는 구조로서는 낮은 강도의 콘크리트 사용 등), 사장재 시공 착수전에 가교각과 상부구조의 엄밀한 상태조사와 그에 대응하는 안전도 해석의 불완전 때문이라고 추정

된다.

문제가 되는 두 부분의 파괴안전율이 거의 같고, 또한 두 부분중 어느 한쪽이 먼저 파괴되더라도 현재의 교량붕괴형상을 줄 수 있기 때문에 두 원인이 함께 보완적으로 연계작용한 것으로 추정된다.

신행주대교의 붕괴원인을 조사한 후에 전술한 바와 같이 교각과 상부구조는 완전히 다른 구조로 바뀌어 재설계된 뒤 재시공하여 개통되었다.