

# 유럽 및 미국과 우리나라의 CRCP



오한진 | 한국도로공사 도로교통연구원 박사후연구원  
 유태석 | 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

## 1. 서론

우리나라의 시멘트 콘크리트 포장(PCCP: Portland Cement Concrete Pavement)은 대부분 줄눈 콘크리트 포장(JCP: Jointed Concrete Pavement)으로 시공되고 있으나, 줄눈 손상으로 인해 유지보수에 많은 어려움을 겪고 있다. 또한 1990년대 후반 및 2000년대 초반 건설된 콘크리트 포장이 노후화됨에 따라 고성능 장수명 콘크리트 포장 건설의 필요성이 대두되고 있다. 이에 JCP보다 초기 시공비는 높으나 유지보수가 적고 공용성이 우수하며 생애주기비용에서 유리한 연속철근 콘크리트 포장(CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement)의 적용이 다시금 주목을 받고 있는 실정이다.

이에 2015 서울 세계도로대회에서 한국도로공사 도로교통연구원, 한국건설기술연구원 및 한국도로학회는 세계 각국의 포장 전문가들을 초청하여 유럽 콘크리트 포장 기술 워크숍을 개최하였다.

도로 포장 공사의 품질인증(Quality Assurance)

및 품질관리(Quality Control), 콘크리트의 내구성 배합 설계 및 이층포설 콘크리트 포장 공법, CRCP의 설계 및 공용성 등 총 3가지 주제로 진행된 유럽 포장 기술 워크숍 중 CRCP의 설계 및 시공관련 주제는 유럽, 미국, 한국의 순서로 발표가 진행되었으며 이는 표 1과 같다.

표 1. CRCP 관련 워크숍 발표 주제

발표 주제
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CRCP design and construction in Europe - Luc Rens, 유럽포장협회 (EUPAVE)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• CRCP design and construction in US - 원문철, 미국 텍사스텍 대학교</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 한국에서의 연속철근 콘크리트포장의 설계 및 시공 - 김성민, 경희대학교</li> </ul>

본 내용은 유럽 콘크리트 포장기술 워크숍에서 발표된 내용 가운데 유럽, 미국 및 우리나라 전문가들이 함께한 CRCP의 적용, 설계 및 공용성에 대한 토의 내용을 기술하였다.

## 2. CRCP 적용 현황

유럽의 여러 국가들 중에서 CRCP를 가장 활발하게 사용하고 있는 벨기에는 1950년에 처음으로 CRCP를 건설하였다. 1960년대 후반 미국 현장답사 이후로부터 본격적으로 CRCP를 건설하기 시작하였으며, 2000년부터 2015년까지 약 35,000,000m<sup>2</sup>의 CRCP 신설 및 보수 건설 사업이 수행되었다. 네덜란드에서는 12개 이상의 대형 건설사업이 수행되었으며, 표면에 투수 아스팔트(Porous asphalt)를 설치하기도 한다. 프랑스에서는 1980년대와 1990년대에 CRCP 건설 사업이 수행되었으나, 최근에는 진행되지 않고 있다. 폴란드에서는 최근 일부 대형 건설 사업이 고속도로 네트워크 개발을 위해 수행되고 있다. 또한 독일에서는 최근 10년 동안 시범 건설 사업이 수행되었으며, 영국과 이탈리아, 스페인 등에서도 CRCP의 건설 사업이 진행되었다.

세계적으로 CRCP를 가장 많이 사용하고 있는 미국의 경우 1921년 버지니아 주에서 처음으로 CRCP를 건설하였다. 그 후 1940년대 후반부터 텍사스, 일리노이, 뉴저지, 캘리포니아, 미시간 주 등 여러 주에서도 CRCP를 건설하기 시작하였다. 2014년 현재 1차로 기준 48,000km가 건설되고, 이중 약 1차로 기준 20,000km 이상이 텍사스에 건설되었다. 그림 1은 미국 각 주의 CRCP 사용 현황을 보여준다.

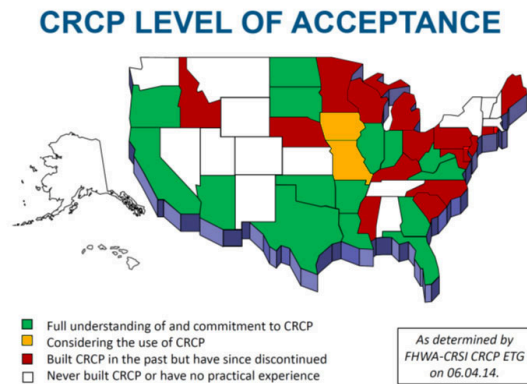


그림 1. 미국의 CRCP 사용 현황

우리나라에 CRCP가 도입된 것은 1980년대로 중부고속도로, 경부고속도로, 서울외곽 순환도로 등에 시공되었으며, 중부고속도로에 약 69km로 가장 많은 구간이 존재하고 있다. 2002년에는 중부내륙고속도로에 위치한 시험도로에 CRCP가 건설되었으며, 2012년에는 평택-제천 고속도로에 CRCP가 가장 최근에 건설되었다.

이처럼 유럽 및 미국의 CRCP는 약 60년 이상으로 오랜 기간 동안 CRCP를 사용하여 왔으며, 우리나라에 비하여 CRCP의 적용이 매우 활발한 것을 알 수 있다.

## 3. CRCP 설계 및 시공

CRCP의 주된 설계는 슬래브 두께 설계와 종방향 철근량 설계로 구분할 수 있다. 유럽의 경우 대부분의 국가에서 카탈로그(Catalogs) 설계법을 사용하고 있다. 교통량과 하부지반의 지지력이 주어지면 CRCP의 두께와 철근비가 산정된다. 이러한 카탈로그 설계법은 피로 손상, Westergaard 탄성층 이론을 이용한 임계하중 산정, JCP보다 횡방향 균열에서 더 높은 하중전달을 하는 것으로 고려하는 계산 방법과 함께 경험적인 방법을 기반으로 하고 있다. CRCP 종방향 철근비의 경우 초기에는 0.85%를 사용하였으나, 경험에 따라 각 국가의 실정에 맞게 추가적인 수정이 이루어졌다.

벨기에는 CRCP 표준단면은 오랜 경험을 통해 수정되면서 현재의 표준단면을 정립하였다. 1970년대에 사용된 초기의 표준단면은 20cm 두께의 CRCP 슬래브, 20cm 두께의 린콘크리트, 그리고 린콘크리트와 CRCP 슬래브 사이에 6cm 두께의 아스팔트 중간층을 설치하였다. 외측의 차로폭은 3.75m로 설계하였다. 철근비는 0.85%를 사용하였으며, 표면으로부터 6cm 깊이에 종방향 철근을 설치하였다. 이러한 단면으로 시공된 CRCP 구간은 중차량이 많이 통과하는 고속도로 구간에서 약 20년 동안 편차아웃

이 거의 발생하지 않아 공용성이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 1970년대 후반 1차 석유 파동으로 인하여 경제성 확보를 위해 설계 단면의 수정이 이루어졌다. 차로 폭을 3.5m로 감소시키고, 철근비를 0.67%로 감소시켰으며 아스팔트 중간층을 생략하였다. 이 단면은 1977년부터 1991년까지 사용되었으나, 하부층의 잦은 침식과 편치아웃이 빈번히 발생하였다. 이에 1992년부터는 CRCP 슬래브의 두께를 23cm로 인상시켰다. 철근비는 0.72%를 사용하고 철근 깊이는 8cm를 사용하였으며, 1995년부터는 철근비를 0.76%로 상향시켰다. 또한 아스팔트 중간층의 중요성을 인지하여 5cm의 아스팔트 중간층을 설치하였으며, 슬래브 모서리부에 응력이 크게 발생하는 것을 방지하기 위하여 외측 차로폭을 다시 증가시켰다. 또한 하부층의 침식에 대한 저항성을 확보하도록 하였다. 따라서 벨기에의 경우 약 40년의 경험을 통해 그림 2와 같이 CRCP 설계 단면을 최적화시켰다.



그림 2. 벨기에 CRCP 단면 (1995년 이후)

미국의 경우 CRCP 설계는 대표적인 콘크리트 포장 설계법인 AASHTO 설계법을 사용하며, AASHTO 설계법은 크게 경험적 설계법과 경험적-역학적 설계법(MEPDG: Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)으로 구분되어진다. 경험적 설계법은 AASHTO Road Test를 기반으로 개발되었으나, 횡방향 균열 등의 CRCP의 특성을 반영하지 못하였다. 경험적 설계법보다 더 복잡한 변수들을 이용하고 CRCP의 공용성을 예측하는 MEPDG에서는 균열 간격과 균열폭을 통해 철근량

을 산정한다. 그러나 기존의 경험적 설계법과 비교했을 때 너무나 많은 입력변수가 필요하게 되어 실제 설계에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 표 2는 미국의 각 주에서 사용중인 CRCP 설계법을 보여준다. 슬래브 두께의 경우 경험식의 AASHTO 설계법을 사용하고 있으며, 철근량 설계 역시 각 주마다 경험에 근거하여 사용하는 것을 알 수 있다.

표 2. CRCP Design & Performance in the US

State	Thickness	Reinforcement
Georgia	AASHTO	0.7% (empirical)
Illinois	Mod AASHTO	0.7-0.8% (empirical)
Oklahoma	AASHTO	0.71-0.73%
South Dakota	AASHTO	0.7-0.8% (empirical)
Texas	Mod AASHTO	0.6-0.68% (empirical)
Virginia	AASHTO	0.7% (empirical)

캘리포니아 주의 경우 2000년대부터 CRCP를 건설하기 시작하였으며, 대부분의 설계는 텍사스 주의 설계법을 채택하였다. 설계수명은 100년이며, 다이아몬드 그라인딩 적용을 고려하여 설계 두께보다 두껍게 슬래브 두께를 설계하였다. CRCP를 이용하여 JCP 보수를 수행하였으며, CRCP의 적용이 점차 확대될 것으로 기대되었다. 일리노이 주는 텍사스 주 다음으로 미국에서 CRCP를 활발히 사용하고 있으며, 1960년대부터 다양한 슬래브 두께 및 하부층 종류, 철근깊이 및 철근비에 대하여 다양한 연구가 진행되었다. 일리노이 주 역시 오랜 기간 CRCP를 건설해오면서 교통하중 및 기후에 맞게 설계 단면을 수정하였으며, 주 간선도로 포장 형식의 70%를 CRCP가 차지하고 있다. 사우스 다코다 주의 경우 1960년대 JCP와 CRCP의 비교 결과, CRCP가 더 우수한 것으로 분석되었다. 텍사스 주는 미국에서 가장 많은 연장의 CRCP가 건설되어 있으며, 콘크리트 포장을 건설할 경우 기본적으로 CRCP를 적용하도록 되어 있다. 일반적인 슬래브 두께는 17.5~32.5cm, 슬래브 중간 깊이에 종방향 철근을

설치하고 있으며, 매우 우수한 공용성을 보이는 것으로 분석되었다.

우리나라의 CRCP 설계는 도로설계요령 등에서 다루고 있지만, 이는 AASHTO 설계법과 동일한 과정으로 구성되어 있다. 최근에는 AASHTO MEPDG와 유사하게 경험적-역학적 설계 프로그램인 한국형 포장설계법(KPRP: Korea Pavement Research Program)을 개발하였다. 그러나 국내에서는 콘크리트 포장이 JCP 위주로 건설되었기 때문에 KPRP의 연구도 JCP를 중심으로 수행되었다. 따라서 우리나라의 CRCP 설계 역시 경험적 설계법인 AASHTO 설계법을 사용하고 있으며, 일반적으로 철근비 0.68%를 사용하고 슬래브 중간 깊이에 종방향 철근을 설치하고 있다.

우리나라와 벨기에 및 미국의 CRCP 슬래브 두께 설계는 AASHTO 설계법을 사용하는 것을 알 수 있었다. 그러나 철근량 설계는 경험적으로 각국의 실정에 맞게 사용하는 것으로 나타났다. 벨기에의 철근비는 0.76%로 미국과 우리나라에 비하여 철근비가 다소 높은 것을 알 수 있다. 철근 깊이의 경우 미국과 우리나라는 슬래브 중간 깊이에 설치하는 반면에 벨기에와 미국의 일리노이 주에서는 종방향 철근을 상부로부터 약 1/3 위치에 설치하는 것을 알 수 있었다.

또한 벨기에와 미국의 경우에는 CRCP 슬래브 하부에 5cm의 아스팔트 기층과 15cm의 전압콘크리트(RCCP) 기층을 조합하여 사용하고 있으며, 우리나라의 경우 현재 CRCP 슬래브 하부에 린콘크리트층을 설치하는 것을 알 수 있었다. 또한 벨기에의 경우 종방향 철근을 지지하기 위한 횡방향 철근을 경사지게 설치하는 것이 미국 및 우리나라와 차이점이 있었다. 그림 3은 벨기에의 CRCP 철근 설치 모습을 보여준다.

최근 벨기에는 CRCP를 고속도로 포장 이외에 회전교차로(Roundabout), 트램 차로(Tram-bus lane)에도 적용하고 있으며, 2층 포설(Two lift paving)을 통하여 합리적이고 경제적인 CRCP 건

설을 추진하고 있다. 그림 4는 2층 포설 CRCP의 모습을 보여준다. 또한 벨기에 뿐만 아니라 유럽 여러 국가에서는 소음저감 및 기능성 확보를 위해 CRCP 상부에 아스팔트 마모층 또는 배수성 아스팔트 층을 사용한 복합포장, 골재노출표면 공법을 사용하는 것을 알 수 있었다.

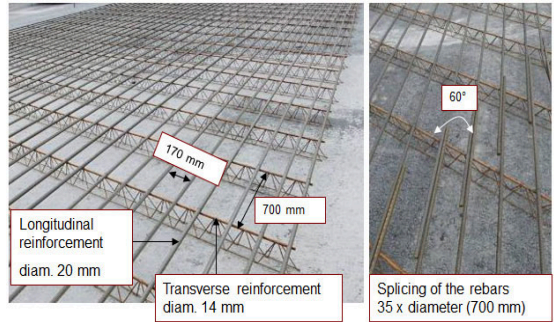


그림 3. 벨기에 CRCP 철근 설치



그림 4. 2층 포설 CRCP

미국과 우리나라는 우수한 공용성 확보에 근거한 CRCP 건설이 중점적으로 진행되고 있는 반면에 유럽에서는 공용성 뿐만 아니라 기능성 및 재활용 골재 사용, 2층 포설 등 경제성을 고려한 CRCP에 대한 시도가 많이 진행되는 것을 알 수 있었다.

#### 4. CRCP의 손상 및 공용성

CRCP의 대표적인 손상 형태인 펀치아웃(Punch-out)

에 대하여 그림 5는 벨기에 CRCP에서 발생하는 펀치아웃의 형태를 보여준다.



그림 5. 벨기에의 펀치아웃

앞서 언급한 바와 같이 벨기에에서는 펀치아웃의 발생을 억제하기 위해 외측 차로폭을 확장시키고 하부층 지지력 확보와 아스팔트 중간층을 설치하였다. 그리고 횡방향 균열이 매우 좁은 간격으로 불규칙하게 발생하는 것을 방지하기 위하여 능동 균열제어(Active crack control)를 적용하였다. 그림 6은 벨기에의 능동 균열제어 방법을 보여준다. 이러한 능동 균열제어는 슬래브 모서리에서 폭 40cm, 깊이 4cm로 1.2m마다 쏘우커팅을 실시한다. 그러나 논의 과정에서 일반적으로 CRCP의 파괴와 상관성이 많다고 알려진 군집 균열(Cluster crack)과 Y-형 균열(Y-crack)에 대해서는 직접적인 연관성이나 관련 증거를 확보하고 있지는 않은 것으로 논의되었다. 이



그림 6. Active Crack Control

는 다른 측면에서 능동 균열제어의 효용성이 크게 없게 되는 결론이 도출될 수도 있을 것으로 판단되었다.

최근 미국의 텍사스 주에서는 새로운 형태의 펀치아웃 메커니즘으로 수평균열(Horizontal crack)에 의한 손상을 발표하였다. 이는 횡방향 균열과 균열 사이에서 종방향 균열이 발생하여 슬래브 전단면에서 발생하는 펀치아웃이 아닌 종방향 철근 깊이에서 발생하는 수평균열로 인하여 횡방향 균열과 수평균열이 만나는 부분에서 슬래브 상부 부분이 분리되는 파괴 메커니즘이다. 그림 7은 새로운 형태의 펀치아웃의 형태(Partial depth failure)를 보여준다.



그림 7. 텍사스 주의 새로운 형태 펀치아웃

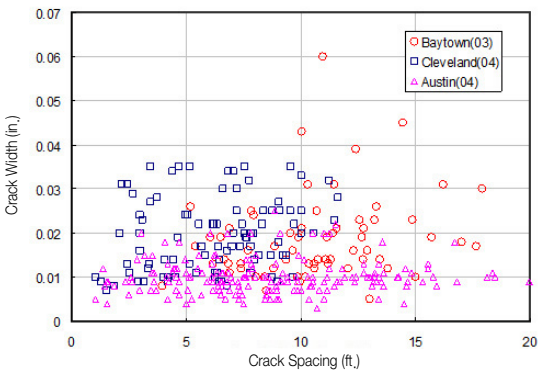
우리나라에서는 CRCP의 적용이 유럽과 미국에 비하여 아직까지 활발하게 적용되고 있지 않기 때문에 국내 실정에 적합한 CRCP 설계를 위하여 CRCP



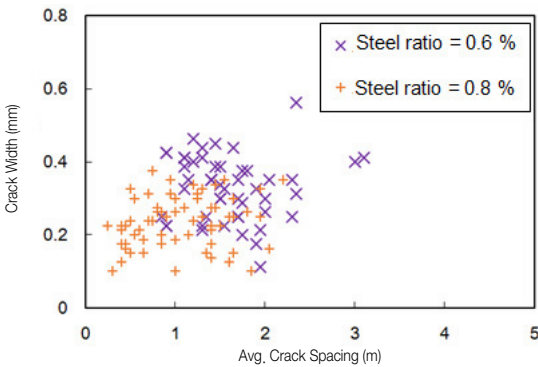
그림 8. 시험도로 CRCP 수평균열

거동을 이해하기 위한 연구가 수행되었다. 시험도로 CRCP 구간에서도 그림 8과 같이 수평균열의 존재가 확인되었다. 수평균열이 발생한 구간에서 균열폭 변위계와 가속도계를 이용하여 수평균열의 거동을 분석한 결과, 수평균열로 인해 분리된 슬래브 상부와 하부의 거동은 매우 유사하게 발생하였다. 따라서 수평균열이 발생하였다고 하여 CRCP의 파괴가 급속하게 발생하지는 않는 것으로 분석되었다.

CRCP 횡방향 균열의 균열간격과 균열폭의 상관관계에서 미국의 경우 그림 9(a)에 나타난 바와 같이 균열간격과 균열폭은 다소 상관관계가 뚜렷하지 않는 것으로 나타나고 있다. 우리나라는 균열간격과 균열폭의 관계에 대한 시험도로 CRCP의 경향을 발표하였고, 그림 9(b)와 같다.



(a) 미국



(b) 한국

그림 9. 균열간격과 균열폭 상관관계

그리고 텍사스 주와 우리나라에서는 수치해석을 이용하여 CRCP의 다양한 거동을 역학적으로 분석하는 연구를 수행하였다.

또한 CRCP의 또 다른 손상으로 횡방향 균열부에서 철근의 부식으로 인한 손상을 우려하였으나, 벨기에와 텍사스 주 모두 철근의 부식으로 인해 파괴는 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 횡방향 균열 폭 사이로 수분이 침투하여 철근이 부식되고 이로 인하여 CRCP의 파괴가 발생하는 것이 아니라 편치 아웃 등의 손상이 발생한 구간에서 횡방향 균열과 인접한 철근의 일부 위치에서 부식이 발생하는 것으로 분석되었다.

전반적으로 유럽과 미국의 CRCP는 우수한 공용성을 보여주는 것으로 분석되었으며, 장기간 우수한 공용성을 확보하기 위해서는 우수한 하부지반의 지지력이 확보되어야 하는 것으로 분석되었다. 텍사스 주에서는 타이바 결속 길어깨 또는 외측차로의 확장이 공용성을 향상시킬 것으로 분석되었으며, 벨기에에서는 아스팔트 중간층의 중요성을 언급하였다.

## 5. 결론

유럽 포장 전문가와의 토론회를 통해 기존에 많이 접해오던 미국의 CRCP 기술과는 상이점이 존재하는 유럽의 CRCP기술에 대해 깊이있는 토의가 이루어졌다.

CRCP의 공용성을 향상시키기 위하여 미국과 유럽에서는 오랜 기간 동안 많은 CRCP 건설 사업을 통해 설계법과 시공기술 등을 발전시켜 온 것을 알 수 있었다.

서로간의 장단점을 공유하고 설계 및 시공기술을 발전시켜 나가는 것이 중요하며, 장수명 콘크리트포장에서 CRCP는 반드시 고려해야 할 포장 시스템이기 때문에 더욱 중요성이 있다고 할 수 있다.