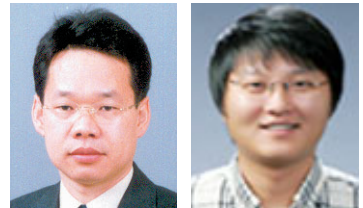


# 유럽의 시멘트콘크리트 포장 배합특성과 스폴링 억제방안



윤 경 구 | 강원대학교 토목공학과 교수

남 궁 경 | 강원대학교 대학원 박사과정 수료

## 1. 서론

중부고속도로의 시작 구간인 하남~남이 구간은 1985년 4월에 착공하여 1987년 12월에 준공하였다. 중부고속도로는 현재 우리나라에서 적용되고 있는 린콘크리트 층을 포함한 포장구조체 형식을 가지고 있으며, 현대식 대형 페이지를 이용해 시공한 것으로 국내 시멘트콘크리트 포장의 시금석이 되었다. 중부고속도로는 설계수명을 20년으로 하여 설계하고 시공하였는바, 이미 설계수명을 지나 10여년을 더 사용하고 있다.

그러나 최근에는 중부고속도로보다 더 늦게 건설된 시멘트콘크리트 포장이 조기에 손상되어 많은 문제점을 보여주고 있다. 우리나라 시멘트콘크리트 포장의 주요 손상형태는 줄눈부에서 스폴링 형태로 발생하고 있다. 이러한 손상원인으로는 콘크리트배합, 단위시멘트량, 품질관리, 시공관리, 페이지 운영방법, 양생, 습윤식 제설제, 유지관리 등에서 그 이유를 찾을 수 있을 것이다.

한편, 우리나라보다 춥고 눈이 많이 오는 북유럽의 시멘트콘크리트 포장은 스폴링 문제가 거의 발생하지 않고 상당히 양호한 내구성을 보여주고 있

며, 설계수명을 35년으로 하여 시공하여 50여년 정도를 사용하고 있다. 따라서 본 기사에서는 유럽에서 사용되고 있는 고강도·고내구성 시멘트 콘크리트 포장 및 배합특성을 고찰하고 스폴링 억제방안을 살펴보고자 한다.

## 2. 유럽의 콘크리트 포장

유럽의 시멘트콘크리트 포장은 EU 국가들의 활발한 교류로 인하여 중차량의 비중이 높아 고성능 시멘트콘크리트 포장이 주를 이루고 있다. 초기의 유럽 콘크리트 포장은 다웰바가 설치된 JPCP(jointed plain concrete pavement)를 시공하면서부터 본격적으로 시멘트콘크리트 포장이 사용되었다. 하지만 줄눈부 파손에 따른 사용자의 불편을 최소화하고 유지·보수비용을 줄이고자, 1980년대 이후에는 높은 단위시멘트량을 사용한 JPCP와 CRCP (continuously reinforced concrete pavement) 포장공법이 점차 도입하고 있다. 근래에 들어서는 교통특성, 기반조건, 환경조건 등을 고려한 카탈로그 디자인을 도입하여 경험적인 요인을 많이 반영하고 있으며, 고성



법을 시공할 경우 미끄럼저항성 및 마모저항성이 높은 화강암질, 규암질 골재를 사용하는 것이 좋다. 다음 표 1은 유럽에서 일반적으로 사용하고 있는 2층 시멘트콘크리트 포장의 배합특성을 나타내었다.

표 1. 유럽의 일반적인 2층 시멘트콘크리트 포장 배합특성

| Method of paving                                 | Standard values                    |             | Air Content (%) |
|--|------------------------------------|-------------|-----------------|
|  | Cement content(kg/m <sup>3</sup> ) |             |                 |
|  | Lower layer                        | Upper layer |                 |
| Fixed-form paving                                | 320                                | 370         | 3.5 to 5.5      |
| Slip-form paving                                 | 350                                | 400         | 4.0 to 6.0      |
| Pavement-quality concrete with super-plasticizer | 350                                | 400         |                 |
| Exposed-aggregate concrete                       | -                                  | 450         |                 |

2층 시멘트콘크리트 포장의 시공은 2대의 페어버를 이용하여 타설하는 것이 일반적이고, 경우에 따라서는 1대의 페이버에 별도의 장비를 부착하여 동시에 시공하는 방법도 사용하고 있다. 상부층과 하부층에 각각의 다른 재료를 사용하여 시공하기 때문에 하부층의 재료가 굳지 않은 상태에서 상부층 재료를 타설하는 것이 중요하여 하부층 시공 후 30~60분 이내에 시공하는 것을 원칙으로 한다. 따라서 시공하는 과정에서 상·하부층 재료의 혼용을 막고 타설시간의 정확성을 지키기 위해서는 시공 시 세심한 주의가 필요하다. 그림 3은 2대의 페이버를 활용한 2층 시멘트콘크리트 포장의 시공 전경이다.



그림 3. 2층 시멘트콘크리트 포장의 시공 전경

### 3. 유럽의 시멘트콘크리트 포장 배합특성

현재 유럽에서 콘크리트 포장의 설계수명은 30~40년으로 우리나라와 미국의 20년 설계수명보다 2배 정도 된다. 이러한 장수명 시멘트콘크리트 포장이 가능한 것은 고내구성 시멘트콘크리트 포장 배합특성에 바탕을 둔다. 따라서 현재 유럽에서 사용하고 있는 시멘트콘크리트 포장의 배합특성을 고찰하고자 한다.

#### 3.1 독일

독일은 고속도로와 공항포장에 1920년대부터 시멘트콘크리트 포장을 시공하고 있다. 1970년대까지는 JPCP와 JRCP로 건설되었고, 다웰바는 1970년 이후에 도입되었다. 하지만 줄눈부의 스폴링 및 스케일링이 심각하게 발생하여 많은 구간을 보수하여 사용한 경험을 가지고 있다. 근래에는 2층 시멘트콘크리트 포장과 CRCP를 시멘트콘크리트 포장에 적극 활용하여 경제성 및 공용성을 증가시키고 있다. 표 2는 고속도로에 적용하고 있는 2층 시멘트콘크리트 포장용 시멘트콘크리트 배합을 보여주고 있으며, 하부층의 경우 단위시멘트량을 340~370kg/m<sup>3</sup>을 사용하고 상부층은 430kg/m<sup>3</sup>를 사용하여, 경제성과 내구성을 확보하고 있다.

표 2. 독일의 2층 시멘트콘크리트 포장 배합특성<sup>3)</sup>

|                             | concrete for base layer with gravels | concrete for base layer with split | concrete for upper layer with split |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Cement (kg/m <sup>3</sup> ) | 340                                  | 370                                | 430                                 |
| Water/Cement ratio          | 0.42                                 | 0.42                               | 0.40                                |
| Dmax(mm)                    | 32                                   | 22                                 | 8                                   |

#### 3.2 벨기에

벨기에의 고속도로는 약 40%가 시멘트콘크리트

포장으로 건설되었는데, 거의 대부분이 CRCP로 시공되었다. 유지보수가 크게 필요하지 않은 CRCP를 선호하여 오래된 시멘트콘크리트 포장의 절삭 후 덧씌우기와 새로운 포장에 CRCP를 광범위하게 사용하고 있다. 하지만 근래에 들어 천연골재의 고갈로 인하여 재생골재의 사용이 늘어남에 따라 2층 시멘트콘크리트 포장을 선호하고 있다. 최근에는 CRCP에도 2층 포장을 적용하여 낮은 유지관리비와 높은 공용성을 유지하고 있다. 이때, 상부층은 425kg/m<sup>3</sup>의 높은 단위시멘트량을 사용하여 고내구성 콘크리트를 시공하고 있으며, 0.42 이하의 낮은 W/C를 사용하여 동결-융해에 저항성이나 내구성을 높일 수 있었다. 표 3은 벨기에 시멘트콘크리트 포장 배합특성을 나타낸다.

표 3. 벨기에의 CRCP 및 2층 시멘트콘크리트 포장 배합특성<sup>4)</sup>

|   | CRCP | Lower layer(CRCP) | Upper layer |
|---|------|-------------------|-------------|
| Dmax(mm)                                    | 20   | 31.5              | 6.3         |
| Maximum w/c ratio                           | 0.45 | 0.45              | 0.42        |
| Minimum cement content (kg/m <sup>3</sup> ) | 400  | 375               | 425         |
| Use of AEA                                  | Yes  | No                | Yes         |
| Minimum air content of fresh concrete       | 3%   | No requirement    | 5%          |

### 3.3 스페인

1960년대 고속도로에서 다웰바가 설치된 JPCP 포장을 시공하였고, 이후에는 트럭하중이 많은 도로에서는 유지보수비용이 적은 CRCP를 적용하여 시멘트콘크리트 포장을 시공하고 있다. 근래에 들어서는 다른 유럽국가와 비슷하게 천연골재의 고갈로 인하여 2층 시멘트콘크리트 포장을 도입하여 사용하고 있다. 스페인의 경우 유럽 남부에 위치해 있어서 동결-융해에 대한 우려가 없음에도 불구하고, 포장의

전반적 내구성 향상을 위해 단위시멘트량을 400~480kg/m<sup>3</sup>의 상당히 높은 단위시멘트량을 사용하여 시멘트콘크리트 포장의 고성능화를 확보하고 있다. 표 4는 스페인 고속도로 2층 시멘트콘크리트 포장의 배합특성을 보여주고 있다.

표 4. 스페인 고속도로 2층 시멘트콘크리트 포장 배합특성<sup>5)</sup>

|                            | Lower layer concrete | Upper layer concrete |
|----------------------------|----------------------|----------------------|
| Dmax(mm)                   | 26                   | 13                   |
| Cement(kg/m <sup>3</sup> ) | 390                  | 480                  |
| Water(kg/m <sup>3</sup> )  | 175                  | 195                  |
| Water/Cement ratio         | 0.45                 | 0.41                 |

### 3.4 소결

유럽에서 사용 중인 시멘트콘크리트 포장은 우리나라와 미국에서 사용하고 있는 단위시멘트량 보다 월등히 많은 시멘트를 사용하는 것을 알 수 있다. 시멘트콘크리트 포장에서 상부층의 경우 최소 420kg/m<sup>3</sup>의 높은 단위시멘트량을 사용하고 있고, W/C는 최대 0.42 정도를 사용하여 시멘트콘크리트 포장의 내구성을 확보하려 노력하고 있는 것을 알 수 있다. 이에 우리나라에서도 경제성 측면만을 고려한 낮은 단위시멘트량과 작업성을 고려한 높은 W/C를 고집할 것이 아니라 시멘트콘크리트 포장의 고성능화를 위한 유연한 자세가 필요하다.

## 4. 국외 스폴링 억제방안

시멘트콘크리트 포장의 줄분부 스폴링은 동결-융해와 깊은 연관이 있는 있다는 것은 주지의 사실이다. 그림 4는 스폴링 발생 전경을 보여 주고 있다. 스폴링은 미국에서는 주로 북부지역에서 발생하여 문제 시 되고 있으며 이에 대한 억제방안도 주로 북부지역에 위치한 주정부에서 시행되고 있다. 한편

유럽에서는 시멘트콘크리트 포장 도입초기에는 스폐링에 대한 문제를 많이 경험하였으나, 고내구성 시멘트콘크리트 포장 도입 이후에는 더 이상 문제 시 되고 있지 않다.

따라서 본 장에서는 스폐링 발생 메커니즘과 발생 원인을 살펴보고 미국과 유럽에서의 스폐링 억제방안을 고찰해 보고자 하였다.



그림 4. 줄눈부 스폐링 발생 전경

#### 4.1 스폐링 발생원인

스팜링은 줄눈부에서 줄눈부를 따라 포장이 파손 되는 현상을 말한다. 이로 인하여 줄눈재의 손상, 시멘트콘크리트 포장의 평탄성 저하 등이 발생하여 사용자의 불편을 초래한다. 스폐링의 발생 메커니즘과 발생원인은 다음과 같다.

- ① 취약한 줄눈부로 수분이 침투하여 동결 및 융해과정을 거치면서 콘크리트 조직에 균열을 유발한다.

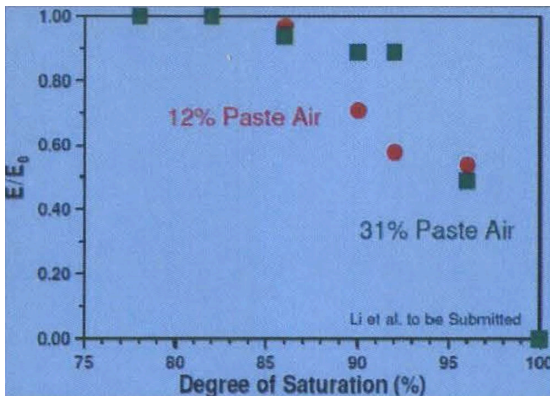


그림 5. 수분포화도와 동결-융해 내구성 관계<sup>7)</sup>

- ② 콘크리트 내부의 공극과 물의 포화도에 따라 균열의 양상이 결정된다. 그림 5는 콘크리트 내부의 수분포화도에 따른 동결-융해 내구성 관계를 나타낸 것으로, 수분포화도 85% 이하에서는 영향을 거의 받지 않으나, 수분포화도가 높아질수록 상대 내구성 지표인 동탄성 계수가 급격하게 떨어지는 것을 보여준다.

- ③ 겨울철 제설작업에 사용되는 염화이온이 콘크리트 내부로 침투하여 화학반응을 유발하여 줄눈부를 손상시키며, 염화물의 흡수력으로 인해 수분포화도를 높여 상기에서 기술한 바와 같이 높은 수분포화도로 줄눈부 손상을 촉진시킨다.

- ④ 줄눈 시공과정에서 발생하는 골재 절단면과 시멘트 페이스트 사이의 간극에 수분이 침투하여 수축과 팽창을 통한 골재 박리현상이 유발된다. 그림 6은 줄눈부에서 발생하는 골재 박리현상을 나타낸다.

- ⑤ 온도 및 습도의 반복적 작용으로 인한 콘크리트의 팽창과 수축 반복작용과 하중 전달장치인 다웰바의 불량 등 복합적인 요인에 의하여 스폐링의 원인이 된다.

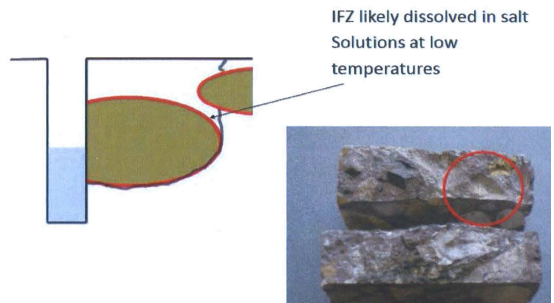


그림 6. 줄눈부 수분침투를 통한 골재 박리현상<sup>8)</sup>

#### 4.2 미국의 스폐링 억제방안

미국에서는 시멘트콘크리트 포장에 발생하는 스폐링을 억제하기 위하여 크게 3가지를 유념하여 시멘트콘크리트 포장을 시공하고 있다. 첫째, 수분이 콘크리트 내부로 침투하여 포화상태가 되는 것을 억

제하고 있다. 둘째, 콘크리트의 수밀성을 중요시하여 철저하게 재료선별 단계부터 관리하고 있다. 셋째, 타설되는 콘크리트의 공극구조를 적절한 형태로 유지하여 스폴링을 억제하고 있다.

구체적인 방안을 살펴보면 다음과 같다.

- ① W/C는 최대 0.40를 넘지 않도록 권장한다. 높은 W/C는 콘크리트 내구성 저하의 원인이 된다.
- ② 콘크리트 내부에 최소 5% 공기량을 유지하도록 권장하고 있다. 콘크리트 내부의 연행공기로 인하여 동결융해에 따른 손상을 방지할 수 있다.
- ③ 간격계수는 최대 200 $\mu$ m를 유지해야 한다.
- ④ 축진염화이온투과시험(RCPT)을 통한 염소이온 침투저항성이 최대 1,500Coulomb를 넘지 못하도록 권장한다. 이는 투수저항성에 큰 영향을 끼친다.
- ⑤ 수밀성을 증진시킬 목적으로 포졸란재료 사용을 적극 권장한다.

### 4.3 유럽의 스폴링 억제방안

유럽에서는 줄분부 스폴링을 억제하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있으며, 미국에서 규정하고 있는 스폴링 억제방안과 유사하나, 추가로 최소 단위시멘트량을 규정하고 있다. 단위시멘트량을 크게 하여, 작업성을 용이하게 증진시키며, W/C를 줄일 수 있으며, 콘크리트 결합력을 증진시키고, 동시에 수밀성을 확보할 수 있다.

유럽에서는 다음과 같은 구체적인 방법으로 스폴링을 억제하고 있다.

- ① 최소 단위시멘트량과 최대 W/C를 제시하여 이를

만족하도록 유도한다. 표 5는 유럽에 속한 벨기에에서 제시하고 있는 최소 단위시멘트량과 최대 물-시멘트 비를 보여주고 있다.

- ② 간격계수는 최대 200 $\mu$ m를 유지해야 한다.
- ③ 단위시멘트량이 증가할수록 최소 공기량도 증가시키되 강도에 영향을 주지 않는 선에서 공기량을 증가시켜야 한다.

### 4.4 소결

시멘트콘크리트 포장의 줄분부 스폴링은 대부분 동결-융해에 기인한다. 따라서 스폴링 억제방안은 콘크리트의 동결-융해 저항성을 증진시키는 것이다. 이를 위해 콘크리트의 수밀성을 증진시켜야 하며, 수분이 콘크리트 내부로 침투하여 포화상태가 되는 것을 억제해야하고, 콘크리트의 공극구조를 적절한 형태로 유지해야 한다.

미국과 유럽의 줄분부 스폴링의 억제방안은 유사하나, 차이점은 유럽에서는 많은 단위시멘트량을 사용한다는 것이다. 단위시멘트량을 크게 하여, 상기의 스폴링 억제방안을 좀 더 용이하게 확보하고 있으며 안전율을 높여 내구성을 확실하게 확보하고 있다. 우리나라 시멘트콘크리트 포장의 현주소와 문제점을 고려한다면, 유럽식 스폴링 억제방안이 좀 더 현실적이라 사료된다.

## 5. 맺음말

우리나라는 주로 초기 시공비만 경제성으로 고려하여 시멘트콘크리트 포장을 설계하고 시공하여 왔다. 또한, 포장형식은 준눈콘크리트 포장으로 단일화되었고, 콘크리트배합과 시공방법도 너무 하나의 방법으로 획일화되어 왔다.

한편, 유럽에서는 시멘트콘크리트 포장의 고성능화와 장수명화를 위해 다양한 방법과 공법들이 개발되어 적용되고 있으며, 유럽의 시멘트콘크리트 포장

표 5. 벨기에의 스폴링을 억제하기 위한 배합규정

|                                  | Minimum cement content (kg/m <sup>3</sup> ) | Maximum w/c ratio |
|----------------------------------|---|-------------------|
| 20 < D <sub>max</sub> ≤ 31.5(mm) | 400   | 0.45              |
| 6 < D <sub>max</sub> ≤ 20(mm)    | 400   | 0.45              |
| D <sub>max</sub> ≤ 6(mm)         | 425   | 0.42              |

은 경험적인 측면에 바탕을 두어 내구성 중심의 고성능 기술로 진화하였다. 유럽의 시멘트콘크리트 포장은 높은 단위시멘트량을 사용하고 제한적인 W/C를 채택하여 콘크리트 재료의 고성능화를 추진하고 있고, 점차적으로 고갈되고 있는 천연골재를 대체하기 위하여 재생골재를 사용하는 2층 시멘트콘크리트 포장공법을 발전시키고 있다. 특히 2층 시멘트콘크리트 포장은 미국에서도 유럽의 고성능화된 시멘트콘크리트 포장을 배우기 위하여 2번의 Scan Tour 팀을 보낼 정도로 선진화되어 있는 공법이며, 스폐링 및 표면박리현상이 극히 드물게 발생하고 있는 것을 알 수 있었다.

우리나라에서도 고속도로 시멘트콘크리트 포장의 스폐링 및 열화로 인한 표면박리현상을 억제하기 위한 방법으로 단위시멘트량을 최소  $400\text{kg/m}^3$  이상 사용하고, W/C를 0.4 이하로 제한하여 사용해야 한다. 동결융해에 따른 균열을 억제하기 위하여 공기량을 최소 5% 이상으로 권장하고, 간격계수는  $200\mu\text{m}$  이하로 하여야 한다.

맹목적인 유럽식 시멘트콘크리트 포장의 수용보다는 일련의 연구를 통하여 우리나라의 기후와 환경조건에 맞는 시멘트콘크리트 포장 설계법 개발, 시공법 개발, 고강도·고내구성 콘크리트 재료 개발 등을 통하여 사용자의 편의와 경제성 측면에 최대한 부합하는 안전하고 쾌적한 도로의 건설을 위해 노력이 필요한 시점이다.

#### 참고문헌

1. Austrian Association for Research on Road, Rail, and Transport, Guidelines and Specifications for Road Construction, RVS 8S.06.32, February 2006 edition, English translation, April 2006.
2. Long-Life Concrete Pavements in Europe and

- Canada, FHWA-PL-07-027, August 2007
3. Werner Remarque, Katrin Bollmann, Peter Lyhs, (2014), "INNOVATIVE CONCEPTS FOR CONCRETE ROADS FURTHER DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION", 12<sup>TH</sup> ISCR, September 2014.
4. Luc Rens, Gorik De Koker, Niels Groenen, Filip Covemaeker, Steven Scharlaekens, (2014), "COMPARISON OF TWO REHABILITATION WORK SITES OF MOTORWAYS : SINGLE VERSUS DOUBLE LAYERED CRCP", 12<sup>TH</sup> ISCR, September 2014.
5. S. Sarrascon, J. Ainchil, (2014), "DESIGN & CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL TWO LAYER CONCRETE PAVEMENT MOTORWAY SECTION IN SPAIN", 12<sup>TH</sup> ISCR, September 2014.
6. Jiake Zhang, Peter C. Taylor, (2014), "A REVIEW OF MECHANISMS ASSOCIATED WITH PREMATURE JOINT DETERIORATION IN CONCRETE PAVEMENTS", 12<sup>TH</sup> ISCR, September 2014.
7. Li, W., Pour-Ghaz, M., Castro, J., and Weiss, J., (2012). "Water Absorption and Critical Degree of Saturation Relating to Freeze-Thaw Damage in Concrete Pavement Joints", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 24, pp. 299-307
8. Zhang, J and Taylor, P., (2012), "Investigation of the Effect of the Interfacial Zone on Joint Deterioration of Concrete Pavements", International Conference on Long-Life Concrete Pavements, Seattle.
9. Anne Beeldens, Claude Ployaert, Luc Rens, Pieter De Winne, (2014), "BELGIAN SPECIFICATIONS FOR FREEZE-THAW-RESISTANT PAVEMENT CONCRETE", 12<sup>TH</sup> ISCR, September 2014.