

# 콘크리트 포장 노면의 마모에 따른 미끄럼저항 변화 예측

## Estimation of Changed Friction by Deformation on the PCC Pavement Surface

김 남 철\* · 전 상 민\* · 전 범 준\* · 이 승 우\*\* · 조 인 성\*\*\*

Kim, Nam Choul □ Jeon, Sang Min · Jeon, Beom Jun · Lee, Seung Woo · Cho, In Sung

### 1. 서 론

타이어와 포장 노면과의 미끄럼저항은 제동거리를 제어하는 기본적인 요소로서 주행안전성을 확보하는데 중요한 역할을 한다. 특히 우천시 도로의 표면이 젖어 있을 경우에는 수막 현상으로 미끄럼저항성이 저하되어 교통사고율이 높은 추세이다. 총 교통사고의 25%가 우천시 도로의 표면이 젖어있을 때 미끄럼저항의 미확보로 인해 발생되며 그중 13.5%는 치명적인 사고의 원인이 된다고 보고되고 있다(Chelliah et al., 2002). 신설포장 중 콘크리트 포장의 경우 미끄럼저항은 거친면 마무리 처리방법, 기후, 포장 표면의 습윤상태, 골재의 특성 등의 여러 인자의 영향을 받고 시간의 경과와 함께 타이어-노면간 마찰에 따라 표면조직이 마모되어 미끄럼저항값이 떨어지게 된다. 그러나 표면조직 마모에 따른 미끄럼저항값의 변화를 예측하는 방안이 제시되어 있지 않아 도로의 유지관리 계획 수립등에 어려움을 주고 있으며 국내외에서 다양한 처리 방법을 통해서 콘크리트 포장표면의 소음을 줄이고 미끄럼저항력을 증가시켜 공용성을 확보하기 위한 여러 종류의 표면 처리 기법이 사용되고 있다.

본 연구에서는 국내에서 많이 활용해온 횡방향타이닝 및 종방향타이닝, 향후 적용이 예상되는 골재노출표면처리 콘크리트포장노면의 미끄럼 저항의 변화를 예측할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 횡방향타이닝 콘크리트포장의 경우 Grady(1981)등의 다양한 교통량하에서 노면 미끄럼저항의 측정 데이터 및 중부고속도로 미끄럼저항 측정치(한국도로공사)데이터를 통계분석하여 교통량별 미끄럼저항 변화 예측식을 산정하였다. 노면 마모에 따른 미끄럼저항 저하를 체계적으로 검토하기 위하여 철륵을 이용한 노면 마모축진 실험을 수행하여 표면조직깊이(MTD)에 따른 미끄럼저항치 변화에 대한 관계를 도출하였고, 실제 도로상에서 교통량 - 미끄럼저항 저하의 관계를 도출하고, 이를 이용하여 실제 도로상에서 미끄럼저항 - 교통량 관계에 대한 데이터가 미비한 종방향타이닝, 골재노출 콘크리트 포장의 교통량별 미끄럼저항 변화 예측식을 제시하였다.

### 2. 미끄럼저항 특성 관련인자 분석

표면조직의 미끄럼저항치는 표면조직 처리방법(매크로 조직), 골재 및 시멘트페이스트 특성(마이크로조직), 차량의 주행속도, 타이어의 종류 및 마모상태, 습윤상태, 결빙상태, 노면의 마모상태등 다양한 인자들에 영향을 받는다.

(가)표면조직-마이크로조직은 모르타르와 잔골재의 특성 및 구성, 마모정도에 따라 표면조직의 특성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 마이크로조직은 거칠기가 0.005mm~0.5mm사이의 값으로 분류된다. 또한 매크로조직은 주로 크기, 모양, 각상, 타이닝등 인위적으로 만든 표면조직의 설계에 의해 구성되며 도로안전에

\*정회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · 공학사 · E-mail: knc@kangnung.ac.kr  
\*\*정회원 · 강릉대학교 토목공학과 전임강사 · 공학박사 · E-mail: swl@kangnung.ac.kr  
\*\*\*정회원 · (주) 포스코건설 차장 · E-mail: ischo@poscoenc.com



민감한 요소인 습윤상태에서의 미끄럼저항성을 인위적으로 확보할 수 있도록 인위적인 조절이 가능하여 국내외적으로 많은 연구와 기술적이 적용이 되어 왔다. 콘크리트 포장도로가 반복주행에 의한 결과로 마모가 진행되면 마이크로조직에 의한 마찰력이 저하될 뿐만 아니라 매크로조직의 깊이가 감소되어 얇은 수막이 형성되어도 타이어와 노면사이의 마찰저항은 급격하게 떨어지어 사고 위험을 더 늘리게 된다. 따라서 공용중인 도로에서 마이크로조직이나 매크로 조직을 적정 수준으로 유지 관리를 하여야 소정의 습윤한 포장에서 미끄럼 저항성을 확보하여 도로의 안전성을 확보할 수 있다.

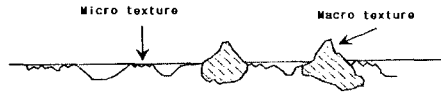


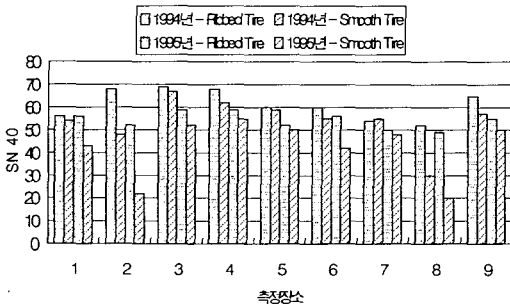
그림 1. 노면조직의 종류

(나)교통량-교통하중의 증가와 함께 미끄럼 저항은 일반적으로 감소하며 바퀴의 이동이 포장면에서 전단 응력을 증가시켜 골재가 마멸, 마모되는 원인이 되며 이런 이유로 미끄럼저항이 감소한다.

(다) 노면의 마모상태 - 노면 마모는 포장재료의 결합으로 골재가 탈리되거나, 타이어 체인 등에 의해 바퀴 자국을 따라 노면 골재가 조금씩 깨져 나가는 경우를 말한다. 노면 마모는 노면의 매크로조직을 파괴하며, 마모된 골재 조각이나 마모로 인한 물 고임 등으로 미끄럼 사고를 유발할 수 있다.

(라) 건조 및 습윤상태 - 습윤노면의 미끄럼저항값은 일반적으로 건조노면의 미끄럼저항값보다 작으며 거의 타이어와 접촉하는 노면에서 크게 좌우된다. 습윤노면에서 미끄럼 사고가 많은 경우, 그 원인은 노면 마찰력이 낮거나 선형 불량 등으로 높은 미끄럼저항값을 요구하는 지역일 경우가 많다. 그러나 미끄럼저항값이 크게 문제가 안되는 지역일지라도 고속으로 주행하는 구간의 경우, 비오는 날 수막현상에 의해 미끄럼사고가 많이 발생할 수 있다.

(마) 표면처리 방법 - 콘크리트 포장에는 다양한 표면처리 방법이 있다. 말하자면 Tining, Burlap drag, Brooming등이 있으며 표면처리 방법에 따라 각각 다른 미끄럼저항값이 나타난다. 주로 표면조직 깊이에 관계가 깊으며 다른 표면처리 방법에 비해 표면조직깊이가 깊은 타이닝은 높은 미끄럼저항값을 나타낸다.



측정장소	표면처리방법
1	횡방향타이닝, 간격 26mm로 일정
2	횡방향 아스트로터프막대 끌기
3	횡방향무작위 타이닝(16mm-22mm-19mm)
4	횡방향 타이닝, 간격은 13mm로 일정
5	횡방향무작위 톱질(16mm-22mm-19mm)
6	횡방향 타이닝, 간격 26mm로 일정
7	종방향 톱질, 간격은 19mm
8	종방향 아스트로터프막대 끌기
9	종방향, 타이닝간격 19mm

그림 2. 여러 표면처리방법에 의한 미끄럼저항값(Colorado Dot, Internal Report, 1979)

### 3. 횡방향타이닝 마모에 대한 현장 측정 데이터 분석

실제도로에서 측정된 미끄럼저항값(GRADY, 1981, 한국도로공사 도로연구소, 2001)의 데이터를 통해 콘크리트 포장 노면의 미끄럼저항성의 변화를 고찰하였다. GRADY의 연구는 물-시멘트비가 0.44인 횡방향타이닝으로 표면처리 된 신설된 콘크리트포장 중 미국 뉴욕의 40구간, 110 장소로부터 교통량과 비교하여 미끄럼저항값을 측정하였으며 교통량은 차량의 구분없이 미끄럼저항측정시의 연평균 교통량을 조사하여 약 8백만 대의 차량이 통과하는 동안 Passing Lanes과 Driving Lanes에서 40mph의 속도로 미끄럼저항을 측정하였다.



측정장비는 동일하게 ASTM E-274-77 기준의 미끄럼저항장비를 사용하였으며 시험에 사용된 타이어는 ASTM E501 기준의 홈이 있는 타이어를 사용하여 습윤한 상태에서 미끄럼저항을 측정하였다. 한국도로공사 도로연구소의 연구는 미끄럼저항값이 측정된 현장의 도로가 중부고속도로로 포장형태가 일부 터널 및 교량 구간을 제외하고는 대부분 콘크리트포장으로 건설되어있으며 전구간을 대상으로 현장측정되었다. 거친면 마무리는 홈 깊이 3mm이상을 표준으로 하고 홈의 간격을 25mm로 한 횡방향타이닝으로 시공되어있으며, 실험실에서 제작된 시편과 같은 조건을 만족한다. 중부고속도로에서 미끄럼저항을 측정하기 위한 조건으로 ASTM E274 기준에 바탕을 둔 미끄럼저항 측정장비의 사용과 ASTM E501 기준의 홈이 있는 타이어를 사용하여 습윤한 상태에서의 미끄럼저항값을 측정하였다. 중부고속도로는 1987년 10월 준공되었으며 2001년 기준으로 14년 공용중인 노선으로 신설되었을 당시 초기의 미끄럼저항수준은 중부고속도로 일부구간의 신설된 확장구간에서의 측정된 미끄럼저항값을 사용하였다.

표 4. 중부고속도로 년도별 교통량

년도	년도별 2차선 교통량(백만대)	누적 교통량(백만대)	년도	년도별 2차선 교통량(백만대)	누적 교통량(백만대)
1992	3.568	20.472	1996	3.784	34.365
1993	3.169	23.642	1997	4.030	38.395
1994	3.346	26.988	1998	3.647	42.043
1995	3.591	30.580			

위 표에 나타난 교통량(중앙대학교 도로 및 교통연구소, 1999)은 고속도로의 특성상 각 IC와 JC를 기준으로 구분한 자료를 방향별, 추월차선으로 구분하여 각 지점의 교통량을 합산하여 평균으로 나타낸 값이다.

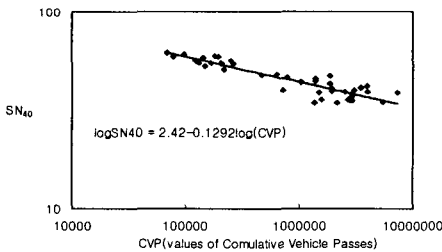


그림 3. 미끄럼저항값 (GRADY, 1981)

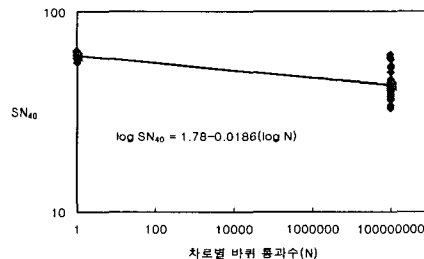


그림 4. 미끄럼저항값(한국도로공사, 2001)

그림 3, 4는 실제 국내 중부고속도로(한국도로공사 도로연구소, 2001)에서의 미끄럼저항 및 GRADY(1981)의 습윤한 상태에서의 미끄럼저항변화를 차로 별 교통량과의 상관관계로 보여주고 있다.

그림 3, 4에서 볼 수 있듯이 SN<sub>40</sub> - 교통량 관계는 log-log 스케일에서 선형이다. 그림4에서의 노면마모에 따른 콘크리트 포장면의 미끄럼저항 측정결과는 logSN<sub>40</sub> = 1.78 - 0.0186(logN<sub>(바퀴이동횟수)</sub>) 의 식으로 표현되며 횡방향타이닝의 경우 차로 별 바퀴 통과수는 교통개방 후 백만회, 2백만회, 5백만회, 천만회, 5천만회 바퀴이동에 미끄럼저항 감소치가 14.4, 15, 15.8, 16.4, 17.7이다. 교통하중의 적용 시 차종의 분류는 자료의 부족으로 무시한다.

#### 4. 마모촉진 실험을 통한 노면 마모에 따른 미끄럼저항 변화에 대한 고찰

마모에 따른 미끄럼저항의 변화를 체계적으로 고찰하고자 실내 마모촉진을 수행하여 마모상태를 정밀하게 평가하면서 마모상태별 미끄럼저항을 측정하였다. 국내에서 활용되고 있거나 적용이 예상되는 횡방향타이닝, 종방향타이닝, 골재노출표면처리를 대상으로 검토하였다.

#### 4.1 시편제작

마모측진 시험을 위하여 제작된 시편의 사이즈는 600mm×300mm×200mm 크기로 제작하였으며 횡방향 타이닝시편 및 종방향타이닝시편의 경우 타이닝 간격 25mm, 3mm정도의 깊이로 표면을 처리했고, 골재노출 표면처리시편의 경우 콘크리트 타설 후 물과 응결지연제의 비율을 1:1로 하여 살포한 후 24시간 경과 후 스틸브러쉬를 사용하여 표면의 골재가 노출되도록 제작하였다. 콘크리트 제작을 위한 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재와 굵은 골재는 일반 도로 포장에(한국도로공사 중앙고속도로) 사용되는 골재를 사용했다. 설계 배합은 적은 슬럼프를 갖는 도로 포장의 콘크리트 배합이어야 하므로 물 시멘트 비를 45%로 고정시키고 기존 콘크리트 포장의 시멘트 수량보다 많은 양의 시멘트(350 kg/ m<sup>3</sup>)를 사용하였다.

표 1. 설계 배합표

굵은골재 최대치수	S/a (%)	W/C (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				공기량 (%)
			W	C	S	G	
32mm	41	45	175	388.9	698.59	1077.65	2

표 2. 현장 배합표

굵은골재 최대치수	S/a (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				공기량 (%)
		W	C	S	G	
32mm	41	3.52	8.22	14.00	21.01	2

표 3. 25mm골재 배합 결과

굵은골재 최대치수	슬럼프(cm)	공기량(%)	타설온도(℃)	7일강도(kg/cm <sup>2</sup> )	28일강도(kg/cm <sup>2</sup> )
32mm	4.25	1	25.7	297.0	381.5

배합은 일괄 투입 방법을 채택하였으며 각 재료를 투입한 후 1분간 건비빔을 실시하고 배합수를 투입하는 순간부터 3분간 비빔을 실시했다. 슬럼프는 두 번의 평균값이고 7일 강도와 28일 강도는 10cm×20cm원기둥의 세 개의 공시체의 평균값이다. 미리 준비한 600mm×300mm×200mm 몰드에 3층으로 나누어 타설하여 공시체를 제작하였다.

#### 4.2 실험 방법

마모측진실험을 하기 위한 휠트랙킹 시험기는 자동차 바퀴에 해당하는 주행차륜을 비롯해서 자동차 하중을 근거로 설계된 접지압, 자동차 주행속도에 근거를 둔 시험 차륜의 주행속도 및 주행거리, 하절기 고온의 조건을 모사한 시험온도 그리고 차륜하중에 침하된 도로의 변형 깊이를 측정할 수 있는 변형량 기록계 등을 갖추고 있다. 주행 차륜은 마모의 측진을 위하여 철륜을 사용하였으며 지름 200mm, 폭 50mm 크기의 바퀴를 사용하였다. 마모측진 실험을 위하여 60kgf의 운하중으로 하중을 고정시켜 시험을 시행하였다. 차륜 하중이 일정하더라도 접지압에 따라 안정도에 차이가 있을 수 있으므로 일정기간을 두고 동일 하중에 따른

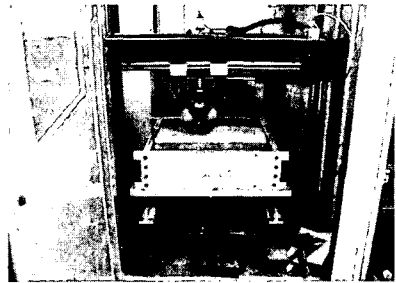


그림 5. 휠트랙킹 장비를 이용한 마모실험

접지압을 시험하여 늘 일정한 접지압을 유지하도록 하였다. 차륜 접지압 산출방법은 스템프식을 사용했고, 주행횟수는 횡방향타이닝과 종방향타이닝, 골재노출표면처리시편 모두 10만회로 통일하였으며, Wheel Pass는 동일한 지점에서 계속 실험을 하였다.

평균조직깊이 측정은 가장 간단하고 일반적인 Sand patch시험법으로 측정했으며, ASTM E965에 제시된 바와 같이 NO 50번체를 90%이상 통과하고 NO100번체에서 100% 잔류하는 입도의 모래 약 25 cm<sup>3</sup>를 노면에 평탄하게 펼쳐서 지름을 측정하여 평균 조직깊이(MTD)를 구한다. 계산방법은 4방향 이상 측정된 직경을 평균한 값과 모래의 체적을 다음 식에 대입하여 넓힌 모래의 평균 주변 조직 깊이를 산출하여 이것을 표면



조직 깊이로 한다.

그림 6,7,8은 횡방향타이닝, 종방향타이닝, 골재노출표면처리시편에서의 미끄럼저항값과 평균조직깊이와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림과 같이 평균조직깊이가 작아질수록 일정하게 미끄럼저항값도 줄어들며 표면 조직깊이에 따른 미끄럼저항값의 변화율은 모든 시편이 일정하다.

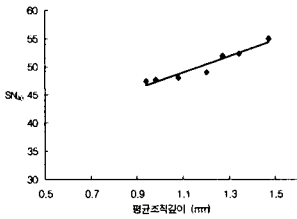


그림 6. 횡방향타이닝의 경우

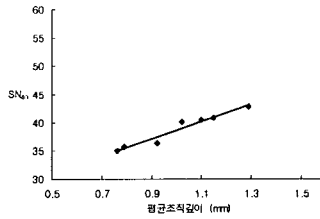


그림 7. 종방향타이닝의 경우

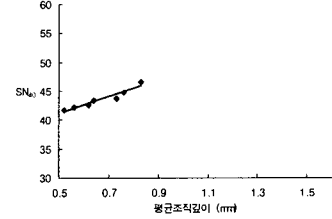


그림 8. 골재노출표면처리의 경우

미끄럼저항 측정은 BPT(British Portable Tester) 장비를 이용하여 측정하였다. 이는 실험실에서 도로표면의 마찰계수를 측정할 수 있도록 만들어진 장치이며 도로 표면과 고무 슬라이더 사이에서의 미끄럼저항을 측정한다. 그림 9에서 보듯이  $SN_{40}$  - 바퀴통과수의 관계는 log-log 스케일에서 선형이다. 습윤한 상태에서 횡방향타이닝시편에서의 미끄럼저항값은 골재노출표면처리시편과 종방향타이닝시편에 비해 큰 미끄럼저항값을 나타내고, 횡방향타이닝시편과 종방향타이닝시편은 마모율에 따른 미끄럼저항감소가 비슷하게 나타나지만 골재노출표면처리시편은 미끄럼저항값의 감소가 상대적으로 작다. 이는 횡방향타이닝 및 종방향타이닝은 시멘트페이스트가 마모되는 것에 비해 골재노출표면처리시편은 노출된 골재가 직접 타이어와의 접촉에 의해 마모되므로 내구성이 우수하다고 판단된다. 횡방향타이닝시편은  $\log SN_{40} = 1.86 - 0.0386 \log N_{(마모시험)}$ , 종방향타이닝시편은  $\log SN_{40} = 1.81 - 0.0517 \log N_{(마모시험)}$ , 골재노출표면처리시편은  $\log SN_{40} = 1.75 - 0.0255 \log N_{(마모시험)}$ 의 식으로 표시된다.

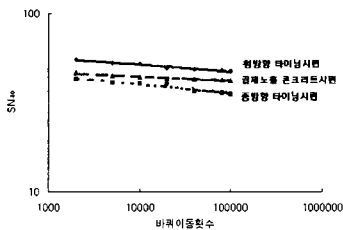


그림 9. 마모축진시험결과

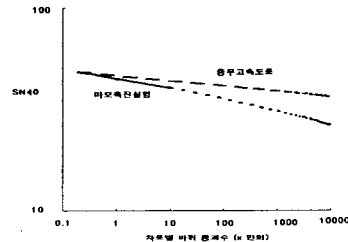


그림 10. 마모축진시험과 실제 도로와의 비교

## 5. 실제 도로와 마모축진 실험에서의 미끄럼저항 변화 비교

### 5.1 횡방향타이닝

실 공용중인 도로에서의 마모에 대한 미끄럼저항성 데이터가 횡방향타이닝만 있으며 이를 비교하기 위해 횡방향타이닝 시편을 마모축진시험을 통해 Wheel Pass에 10만회 바퀴를 이동시켜서 마모시험을 한 경우가 실제 콘크리트포장 노면보다 미끄럼저항값의 감소 속도가 빠르게 나타났다. 현장에서 측정된 차로별 바퀴 통과수와 마모시험에서의 Wheel Pass에서 철륵의 통과수를 비교하여  $SN_{40(field)} = (N_{field}/N_{마모시험}) \times SN_{40(마모시험)}$  과 같은 식으로 나타낸다.

$$\log SN_{40(field)} = \left( \frac{1.783 - 0.0186 \log N_{field}}{1.86 - 0.0386 \log N_{마모시험}} \right) \times \log SN_{40(마모시험)} \quad (1)$$

## 5.2 종방향타이닝시편 및 골재노출크리트시편의 미끄럼저항성 변화 예측

실제 콘크리트 노면의 종방향타이닝과 골재노출공법으로 거친면 마무리가 된 현장에서의 교통량에 따른 미끄럼저항 측정값의 데이터는 없지만 횡방향 타이닝의 경우처럼 log 스케일에서 미끄럼저항값은 선형이며 종방향타이닝, 골재노출표면처리 시편제작을 통해 측정된 미끄럼저항값의 감소율이 횡방향타이닝시편과 비슷하여 실제 콘크리트 포장에서의 종방향타이닝 및 골재노출공법으로 처리된 노면에서의 미끄럼저항값을 가정할 수 있으므로 표면조각의 수명을 예측할 수 있다. 실제도로와 마모실험에 의한 미끄럼저항값 감소 기울기

의 비  $\left( \frac{1.783 - 0.0186 \log N_{field}}{1.86 - 0.0836 \log N_{마모실험}} \right)$  를  $\alpha$ 라하고 이는 횡방향타이닝의 경우 식(1)과 같이 표현된다.  $\alpha$ 가 표면조각과 무관하다고 가정하면 종방향 타이닝의 미끄럼저항값과 골재노출공법으로 처리된 콘크리트 노면의 미끄럼저항값의 감소치를 실내 마모실험결과를 이용하여 예측할 수 있으며 다음과 같이 나타낸다.

실제 콘크리트 포장의 종방향타이닝 경우

$$\log SN_{40(field)} = 1.81 - 0.0517 \log N_{(마모실험)} \times \alpha \quad (2)$$

골재노출공법의 경우

$$\log SN_{40(field)} = 1.75 - 0.0255 \log N_{(마모실험)} \times \alpha \quad (3)$$

## 6. 결과

본 연구를 통하여 콘크리트 포장 표면에서의 마모에 따른 미끄럼저항값의 신뢰성 있는 식을 제안하기 위해서는 충분한 데이터베이스가 필요하다. 마모측진실험을 하여 실제 공용중인 국내의 고속도로와의 바퀴 이동횟수에 따른 미끄럼저항값을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 횡방향타이닝에서의 미끄럼저항값은 교통개방 후 실제도로에서 백만회, 5백만회, 천만회, 5천만회 바퀴이동에 의한 미끄럼저항 감소치가 14.4, 15.8, 16.4, 17.7 이고 마모실험과 비교하면 동일하게 미끄럼저항값이 감소할 경우 312회, 423회, 774회, 1421회 철륵이 이동한 것과 같다.
- 2) 실제 종방향타이닝 도로에서 타이어의 이동횟수에 의한 미끄럼저항값의 감소치를 가정하면  $\log SN_{40(field)} = 1.81 - 0.0517 \log N_{(마모실험)} \times \alpha$ 로 예측할 수 있다. 따라서 실제도로에서 차량의 바퀴가 백만회 이동했을 경우  $\Delta SN_{40(field)}$ 은 16.6이 감소한 것과 같다.
- 3) 실제 골재노출공법으로 시공한 도로에서 타이어의 이동횟수에 의한 미끄럼저항값의 감소치를 가정하면  $\log SN_{40(field)} = 1.75 - 0.0255 \log N_{(마모실험)} \times \alpha$ 로 예측할 수 있다. 따라서 실제도로에서 차량의 바퀴가 백만회 이동했을 경우  $\Delta SN_{40(field)}$ 은 7.6이 감소한 것과 같다.

## 참고문헌

1. 노관섭, 윤여환, 유수연, 이영미, "도로의 횡방향 마찰계수와 곡선반경에 관한 연구", 한국건설기술연구원 1997.12
2. 이용세, "콘크리트포장 표면처리공법 조사보고서", (주)서영기술단 부설기술연구소, 2000.6
3. 조운호, "중부고속도로 파손상태 조사보고서", 중앙대학교 도로 및 교통연구실, 1999.10
4. 홍승호, "도로 선형별 미끄럼 저항 특성 연구(I)", 한국도로공사 도로연구소, 2001.12
5. Chelliah, Stephanos, Shah, Smith, "Developing a Design Policy to Improve Pavement Surface Characteristics", 82th Annual Meeting of Transportation Research Board, 2003.1
6. John E. Grady, William P. Chamberlin, "Groove-Depth Requirements for Tine-Textured Pavements", Transportation Research Record 836, 1981
7. T.Paul Teng, P.E, "Assesment of LTPP Friction Data", FHWA-RD-99-037, 1999.3
8. Todd E. Hoerner, Kurt D. Smith, Roger M Larson, Mark E. Swanlund, "Current Practice of PCC Pavement Texturing", Transportation Research Record 2003 Annual Meeting, 2002.11