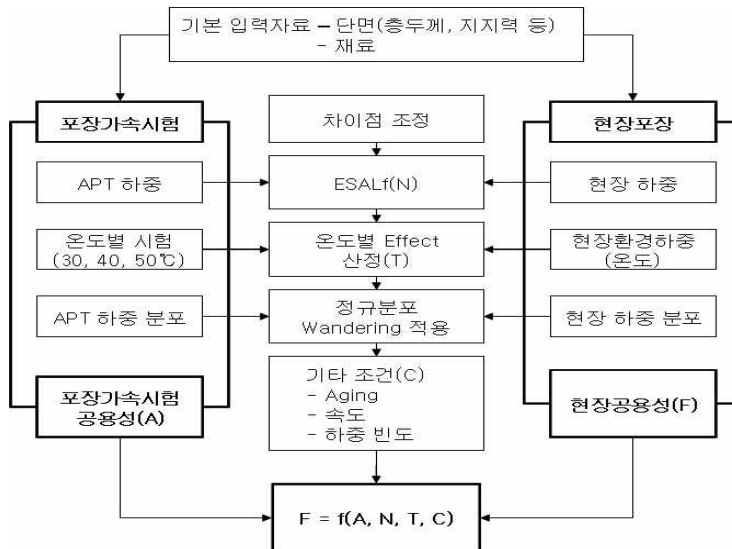




상태에서 시험도로의 실측 결과 값을 기준으로 포장가속시험의 결과에 현장 조건을 입력하여 이끌어낸 결과를 보정하는 방법으로 고려하였다.

2. 변수 정의

〈그림 1〉에서와 같이 단면과 재료가 동일한 조건에서 표면 러팅에 대한 현장 공용성(F)은 포장가속시험의 공용성(A), 하중(N), 온도(T) 및 그 외 조건(C)의 함수로 나타낼 수 있다. 각 변수들의 정확한 보정을 위해, 현장과 포장가속시험기의 차이점을 명확히 할 필요가 있다. 따라서 본 장에서는 각 변수에 대한 정의와 보정 방법에 대해 다루었으며, 포장가속시험 시험 조건은 〈그림 2〉와 같다.



〈그림 1〉 포장가속시험과 시험도로의 주요 차이점

구 분	포장가속시험	온도 : 50℃			온도 : 35℃			온도 : 40℃		
		표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)
하 중	9.0ton	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)	표층(9cm)
타이어 내부압	1.00 Mpa	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)	중간층(7cm)
타이어 접지압	0.723Mpa	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)	기층(18cm)
타이어 접지면적	1220.1cm ²	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)	보조기층(30cm)
축	단축 복륜	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)	노상(185cm)
시험 온도	35, 40, 50℃ (5cm 깊이)									

〈그림 2〉 포장가속시험 조건

2.1 하중

현장 교통하중과 포장가속시험 하중의 조건을 동일하게 하기 위해 ESALf를 이용하였다. 시험도로의 경우 축하중이 개통기간 동안 모두 기록되었고, 포장가속시험의 경우 단축 복륜의 하중을 조절하여 적용하였기 때문에 각 하중에 따른 ESALf를 식 (1)을 통해 산정하여 적용하였다.(2)



$$ESALf = \frac{(L_1 + L_2)^{4.79}}{(18 + 1)^{4.79} L_2^{4.33}} \cdot \frac{10^{\frac{G_t}{\beta_{18}}}}{10^{\frac{G_t}{\beta_t}}} \quad (1)$$

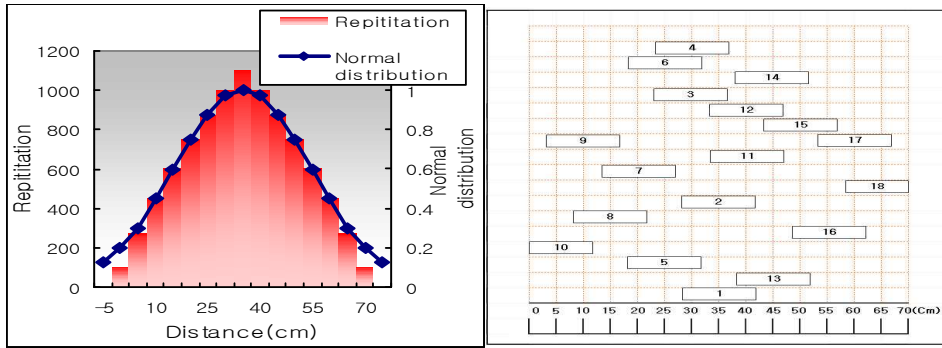
- 여기서,
- L_1 : axle load, kips
 - L_2 : axle code, ($L_2 = 1$; single, $L_2 = 2$; tandem, $L_2 = 3$; tridem)
 - G_t : $\log \frac{P_0 - P_t}{4.2 - 1.5}$, ($P_0 = 4.2$, $P_t = 2.0$)
 - β : $0.4 + \frac{0.081(L_1 + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} L_2^{3.23}}$, ($SN = 6.24$)
 - $SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3 + a_4 D_4$
 - $D_1 = 5, D_2 = 7, D_3 = 18, D_4 = 30,$
 - $a_1 = 0.157$ (아스팔트 표층 : 마찰안정도 750이상)
 - $a_2 = 0.157$ (아스팔트 중간층 : 마찰안정도 750이상)
 - $a_3 = 0.157$ (아스팔트 기층 : 마찰안정도 750이상)
 - $a_4 = 0.157$ (쇄석 보조기층 : CBR 70이상)

2.2 온도

포장체 온도의 경우, 현장에서는 매우 다양한 온도 패턴을 보이기 때문에, 이를 정량화하기 위해서 다양한 온도에 적용된 하중이 표면 러팅에 미치는 영향을 정량화하여야 한다. 따라서 포장가속시험을 다양한 온도에서 실시하여 온도 영향력에 대한 정량화가 필요하다. 특히, 고온의 경우에 표면 러팅이 많이 발생하기 때문에 시험온도를 30℃이상으로 하였고, 20℃이하의 경우는 공용성에 미치는 영향이 미세하다고 판단하였다. 하지만 신뢰도 확보를 위해 향후 20℃온도 조건에서 시험을 실시할 계획에 있다. 포장가속시험의 온도는 포장 표면에서 깊이 5cm를 기준으로 하여 33, 40, 50℃로 일정하게 유지한 상태에서 시험이 진행되었으며, 누적 ESAL에 따른 표면 러팅을 측정하여 표면 러팅에 대한 온도와 하중의 모델을 만들었다. 모델에 적용된 현장 온도는 표면에서 깊이 5cm의 30분 평균온도를 적용하였고, 하중은 그 시간대의 교통량을 ESALf로 환산하여 적용하였다.

2.3 하중 분포

하중 분포는 실제 현장 포장에 가해지는 차량하중의 분포를 모사하기 위해 구현되어야 할 부분이다. 해외 사례의 경우 최대 1.0m ~ 1.5m 폭의 정규 분포형태를 보였으며, 국내 현장의 하중 분포 조사결과 최대 1.6m 폭의 정규 분포를 갖는 하중분포를 보였다.(3) 따라서 포장가속시험의 타이어 폭인 26cm를 고려하여 1.4m 폭을 적용하였으며, 누적 하중재하 분포는 정규 분포 형태를 구현하였다. 따라서 Dual Tire의 중심에서 좌우로 약 35cm의 Wandering을 계획하였다. 센서를 통해 5cm 간격으로 Wandering이 제어되기 때문에 <그림 3>과 같이 하중재하 위치별 하중 적용수를 정규분포와 비슷하게 계획하였다. 또한, 차량이 이동할 때 하중 분포가 Random으로 변하기 때문에 포장가속시험에서도 마찬가지로 난수표를 계획하여 하중의 위치를 설정하였고 이를 1Cycle로 하여 반복하여 하중을 재하 하였다. 이때 1Cycle 하중 재하 횟수를 4,600회로 하였다.



〈그림 2〉 포장가속시험 하중 분포

2.4 기타 조건

그 외로 현장과 포장가속시험의 공용성 조건에 차이는 Aging, 속도, 하중빈도 등이 있다. 이는 포장가속시험에 제한적으로 고려되기 때문에, 온도, 하중 재하수, 하중분포 조건에서 구해진 표면 러팅 공용성 결과를 시험도로의 표면 러팅 공용성과 비교하여 보정하는 방법을 통해 위의 조건들을 고려하였다.

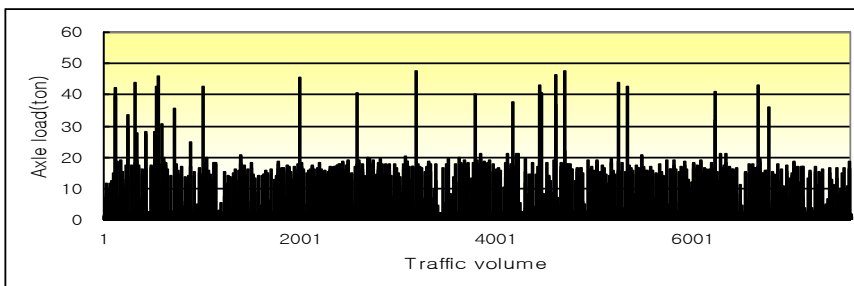
3. 자료 수집 및 분석

3.1 시험도로 자료

시험도로 자료의 경우 시험도로가 차량이 개통된 시기만의 자료를 활용하였으며, 표면 러팅 역시 교통 개방에 따라 측정하였던 자료를 활용하였다.

3.1.1 교통량 및 온도 데이터

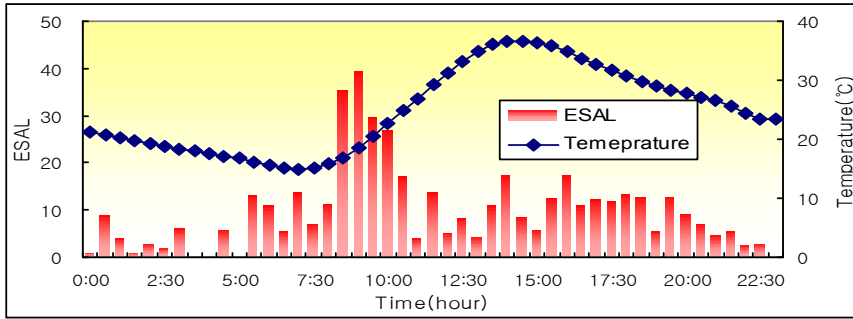
시험도로 개통 시 통과하는 모든 차량에 대해 축하중을 측정된 자료를 ESALf로 환산하였다. 온도는 30분 단위로 수집되었기 때문에 환산한 다음 30분 단위로 누적한 하중을 포장가속시험 모델에 적용하였다. 〈그림 3〉은 2004년 4월 18일 0시부터 24시까지 기록된 축하중에 대한 기록이며, 〈그림 4〉는 이를 30분 단위로 ESALf로 환산한 자료 결과와 그 시간대의 온도 자료이다.



〈그림 3〉 시험도로 1일 동안의 축하중분포

3.1.2 표면 러팅

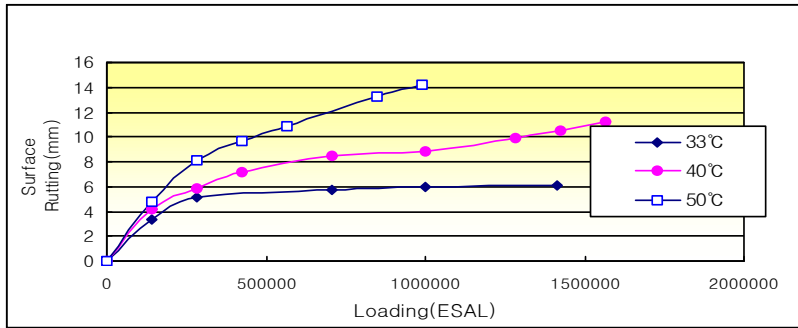
시험도로의 표면 러팅은 ARAN 장비를 이용하여 개통시기에 맞게 측정된 자료를 활용하였다. 이때 표면 러팅은 ESALf로 환산 교통량에 따라 발생한 표면 러팅으로 정의하였으며, aging에 대한 부분은 고려하지 않았다.



〈그림 4〉 시험도로의 30분 단위의 ESAL 및 온도 자료

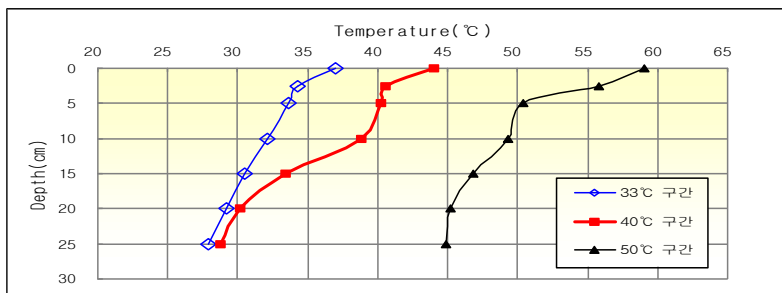
3.2 포장가속시험 자료

포장가속시험의 표면 러팅은 하중 재하 전 표면을 기준으로 하중 적용에 따른 표면 러팅을 레이저 횡단 프로파일메터를 이용하여 측정하였다. 측정된 횡단 프로파일은 하중재하 전 측정값에서 하중재하에 따라 가장 많은 표면 러팅이 발생한 값의 차를 누적 표면 러팅 량으로 정의하였다. 〈그림 5〉는 실제 적용된 단축 복륜 9ton의 하중을 ESAL로 환산하여, 그에 따른 표면 러팅 량을 나타낸 것이다.



〈그림 5〉 온도에 따른 포장가속시험의 표면 러팅

온도에 따른 표면 러팅 발생형태를 보았을 때 50°C구간과 40°C구간은 일정량 이상의 표면 처짐이 발생함에도 불구하고 계속 증가하는 패턴을 보이지만, 33°C구간은 일정량 표면 처짐이 발생하면 표면 처짐의 증가하는 정도가 급격히 줄어든다는 것을 확인할 수 있었다. 이로서 아스팔트 포장의 소성변형에 크게 영향을 주는 온도는 35°C ~ 40°C이상임을 확인할 수 있었다. 마지막으로 본 실험을 진행하는 동안의 측정된 평균온도는 〈그림 6〉과 같다.



〈그림 6〉 포장가속시험의 35°C, 40°C, 50°C구간의 깊이별 평균 온도

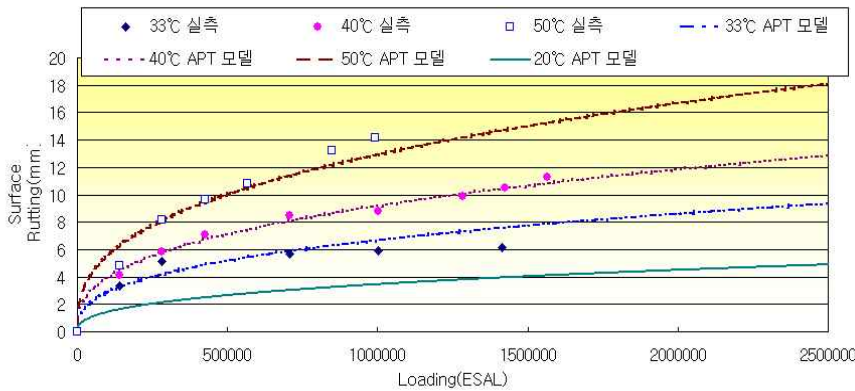
4. 알고리즘 개발 및 적용

4.1 포장가속시험의 표면 러팅 모델 개발

포장가속시험의 결과에 따른 온도별 표면 러팅을 이용하여 온도와 하중에 따른 모델을 식 2와 같이 이끌어 냈으며, 실측값과 비교하면 <그림 7>과 같다. 이는 알고리즘 적용의 첫 번째 단계로 포장가속시험 표면 러팅 공용성(A)의 온도(T)와 하중(N)에 대한 정의를 의미한다.

$$Surface\ Rutting_{(APT)} = 10^{-3.71} N^{0.368} T^{1.538} \quad (2)$$

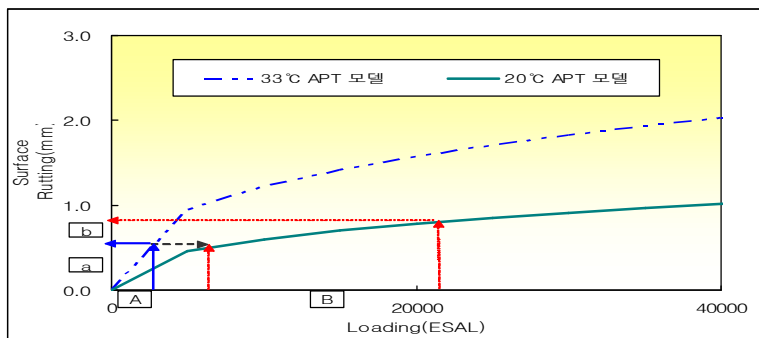
여기서, N : 누적하중 재하수(ESAL)
 T : 온도(°C)



<그림 7> 포장가속시험 표면 러팅 공용성 모델

4.2 시험도로 온도 및 교통량 자료 적용

알고리즘의 두 번째 단계는 포장가속시험을 통해 얻어진 표면 러팅 모델에 시험도로의 교통량과 온도를 적용하는 것이다. 이때 온도와 하중에 따른 누적 표면 러팅은 <그림 8>과 같이 어느 온도(33°C)에서 하중(A)이 가해져 일정량의 표면 러팅(a)이 발생하면, 온도가 변화(20°C)된 상태에서 하중(B)이 작용할 때의 온도(20°C)에서 러팅은 기존에 발생한 러팅량(a)에 현재 온도에 작용한 하중에 의해 발생한 러팅량(b)의 누적량이 된다. 이는 <그림 1>에서의 차이점 중 포장가속시험 표면 러팅 공용성(A)과 하중(N), 온도(T)에 대해 현장 조건에 의해 보정이 이루어지는 단계이다.

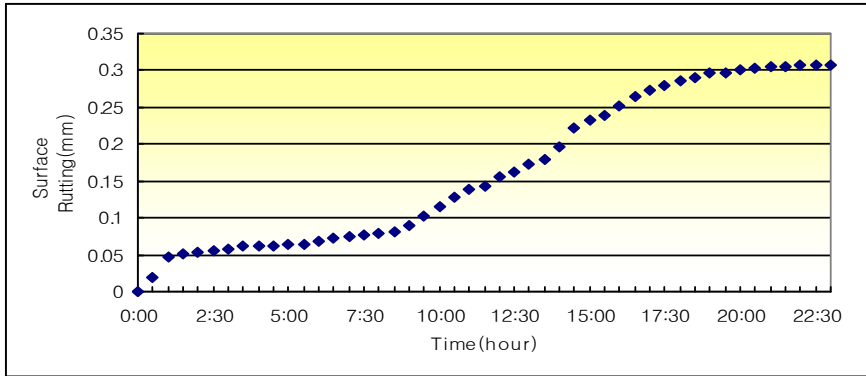


<그림 8> 표면 러팅의 누적 적용

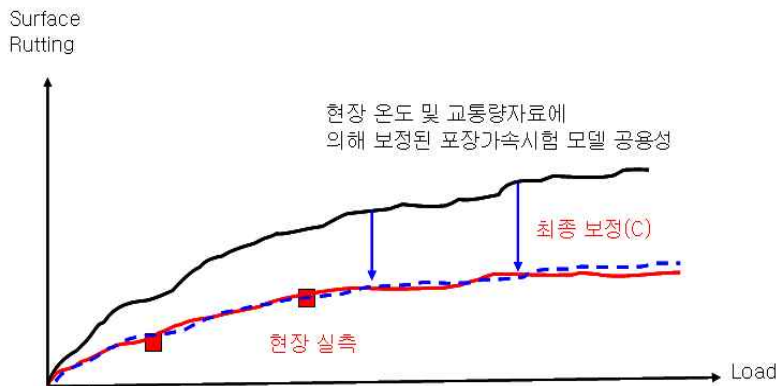


4.3 시험도로 표면 러팅 공용성 자료를 통한 보정

포장가속시험의 모델을 시험도로의 하중과 온도에 대해 보정을 실시한 후, 시험도로의 실측 러팅자료를 통해 최종적인 보정을 실시한다. 이는 포장가속시험과 시험도로의 차이점(C) 중 aging, 속도, 하중 빈도에 대한 보정에 해당된다. 이를 통해 최종적으로 시험도로와 포장가속시험과의 표면 러팅 예측 모델을 이끌어 낸다. <그림 9>는 시험도로에의 하중 및 온도(2004년 4월 18일)를 포장가속시험 모델에 적용한 결과이다. 위와 같은 자료를 누적하여 최종적으로 시험도로의 표면 러팅과 비교한 후 보정을 하게 된다. <그림 10>은 향후 이루어지게 되는 보정의 예시를 보여주고 있다.



<그림 9> 시험주요 자료를 통한 포장가속시험 모델 보정



<그림 10> 포장가속시험과 시험도로 공용성의 최종 보정

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 한국도로공사 시험도로와 포장가속시험 결과를 이용하여 표면 러팅에 대한 예측 알고리즘을 제시하였다. 표면 러팅 예측에 필요한 보정계수의 중요 변수들에 대하여 정의하였으며, 그 중 온도 및 하중에 대하여 포장가속시험을 통하여 정량화 하였다. 또한 포장가속시험 결과에 의한 모델에 현장 데이터와 하중 자료를 적용하는 방안을 제시하였다.

(1) 포장가속시험과 현장 포장의 표면 러팅에 미치는 주요 인자인 하중, 온도, 하중 분포에 대한 정의와 차이점을 통해, 신뢰도 있는 예측 모델 개발 방안을 제시하였다.



(2) 포장가속시험을 통해 표면 러팅에 대한 온도와 하중(ESAL)의 영향력을 정량화 하였고, 이를 현장 포장에 적용할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

(3) 포장가속시험을 통하여 온도와 하중과 관련된 표면 러팅 예측 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$Surface\ Rutting_{(APT)} = 10^{-3.71} N^{0.368} T^{1.538}$$

향후 연구과제는 다음과 같다.

- 다양한 온도(20℃)에서의 포장가속시험을 통해 온도가 표면 러팅에 미치는 영향력의 신뢰도 있는 정량화
- 포장가속시험을 결과를 활용하여 시험도로의 자료를 통해 최종적인 예측 모형 개발

참고문헌

(1) Al-Qadi, I.L. and Nassar, W.N.(2003) "Fatigue Shift Factors to Predict HMA Performance" , International Journal of Pavement Engineering, Volume4, No2, pp.69~76

(2) "AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures" (1972) American Association of State Highway and Transportation Official

(3) 강민수(2001), "차량 Wandering의 포장손상 저감 정량화 연구" 한양대학교, 석사학위 논문