

# 터널구간 운행시 KTX 플랩 작동에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 예측식 제안

## A Suggestion of indoor CO<sub>2</sub> concentration prediction equation by operating KTX flap in Tunnel Sections

소진섭<sup>†</sup>

유성연<sup>\*</sup>

김익희<sup>\*\*</sup>

Jin-Sub So

Seong-Yeon Yoo

Ick-Hee Kim

### ABSTRACT

In December 2006, the Ministry of Environment in Korea established the "Indoor Air Quality Management Guidelines in Public Transportation." As the items of the guideline, CO<sub>2</sub>(Carbon dioxide) and PM10(Particulate matter). Therefore, the air quality inside the train is supposed to be ruled by this guideline. This study calculated the increase or decrease rate of the CO<sub>2</sub> concentration by using the data measured in accordance with flap operation. In case of flap close or open, the calculated CO<sub>2</sub> concentration variation was 6.32ppm/min. The CO<sub>2</sub> concentration prediction equation was derived from the general equation and the actual measured value are compared with the predicted CO<sub>2</sub> concentration suggested during the KyungBu high speed railway construction. The predicted value show good agreement with the measured data.

### 1. 서론

철도차량 공기조화장치는 실내 환경과 에너지 효율, 그리고 고객의 쾌적함과 건강을 유지시켜주는 종합적인 시스템으로 그 중요성이 매우 크다. 현재는 법적인 규제대상은 아니지만 2006년 12월말에 제시 하였던 대중교통수단 실내공기질 관리 가이드라인으로 철도를 이용하는 승객들은 가정에서와 같이 쾌적한 실내공기질을 요구하고 있다. KTX 공기조화장치의 특성으로 객차 실내 온도는 객차 컴퓨터에 의해 자동으로 작동되기 때문에 실내공기질을 항상 적정하게 유지관리하고 있다. KTX 운행환경 특성으로는 국내의 지리적 여건상 터널이 많다. 이에 따라서 터널지점을 통과하면서 승객 인원수가 정원에 근접할 경우에는 실내 CO<sub>2</sub> 농도는 증감되는 것으로 나타났다. 이와 관련하여 소진섭 등[1-3]은 KTX가 운행하는 경부선과 호남선을 대상으로 실내공기질을 측정하고, 터널구간에서 KTX 여압장치 작동에 따른 실내 공기질 변화에 대해 KTX ATESS 레코더 기록파일과 비교 분석하였다. 또한 권순박 등[4]은 KTX를 대상으로 터널구간과 CO<sub>2</sub> 농도 상관관계를 제시하였다. 전동차에 대한 CO<sub>2</sub> 농도 예측은 있지만, 열차를 대상으로 수행한 CO<sub>2</sub> 농도 예측 연구는 아주 낮은 수준이다. 한국고속철도건설공단[5]에서는 KTX 차량 환기에 대한 설계단계에서 CO<sub>2</sub> 농도 예측을 감리사인 BECHTEL사가 검토하였다. 소진섭 등[6]은 전동차 실내공기질을 측정하고, 상기 예측 모델을 이용하여 전동차가 정차하여 출입문이 열릴 때를 환기시점으로, 출입문이 닫힐 때는 환기가 없는 일반적인 조건만을 고려하여 예측하였다.

본 연구에서는 KTX가 운행하는 고속선을 대상으로 운행 중 터널에서 KTX가 터널 진입 시 발생하는 고압의 압력파가 객실 내로 유입되어 이명현상을 방지하기 위해 차량의 플랩이 터널입구에 설치된 감지 장치에 의해 터널의 존재가 확인되면, 자동으로 플랩이 닫히도록 되어 있어서 이에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 승객수 변동, 외부의 깨끗한 공기(신선공기) 공급량과 신선공기 유입이 없는 조건, 그리고 이동거리, 운행패턴 시간, 객실 체적, 실내온도 등을 고려하여 계산한 바 있다. 하지만 BECHTEL사에서 제시하고 있는 예측 모델은 운전패턴과 터널길이, 그리고 KTX 차체에 설치되어 있는 플랩이 열리고 닫히는 신호시점을 알아야만 가능하다. 또한 KTX 객차 컴퓨터에 의해 실내온도는 센서에 의해 자동으로 급기량을

† 정회원, 한국철도공사 연구원, 기술연구팀  
E-mail : sojin71@korail.com

TEL : (042)615-4713 FAX : (02)361-8542

\* 비회원, 충남대학교, BK21 메카트로닉스사업단, 교수

\*\* 정회원, 한국철도공사 연구원, 경영연구팀

조절하여 항상 적정 온도를 유지하고 있기 때문에 예측에 어려움이 있다. 따라서 KTX 운행 환경조건과 터널 구간의 시·중점을 통과하는 시간을 파악 하지 못하면, 많은 오차가 발생하므로 KTX 동력차에 설치되어 있는 ATESS 기록파일 분석이 별도로 필요하다.

본 연구는 KTX 실내공기질 측정과 KTX 차체에 설치되어 있는 플랩의 작동 유무에 따라 KTX가 고속선을 운행할 때 터널의 영향으로 플랩의 열리고 닫힘에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도가 어느 정도인지 ATESS기록파일을 분석하지 않고도 쉽게 예측할 수 있는 식을 제안하고자 한다.

## 2. CO<sub>2</sub> 농도 예측

일반적으로 알려져 있는 실내 CO<sub>2</sub> 농도 예측은 고정되어 있는 건물에 비해 움직이는 철도차량은 다양한 운행조건과 변수가 많다. 더욱이 차체의 밀폐율이 낮은 열차 일수록 공기유입과 배출 정도를 파악하는데 어려움이 있다. 일반적인 CO<sub>2</sub> 농도 예측 식은 다음과 같이 제시하고 있다. 실내 CO<sub>2</sub> 농도 예측은 식 (1)의 미분방정식으로 나타낼 수 있다[7-9, 12]. 실내에 있어서 CO<sub>2</sub>의 발생이 있는 경우에 환기를 행하면 시간의 경과와 더불어 평행상태로 되어 실내의 CO<sub>2</sub> 농도가 구해진다.

$$V \cdot dK = W \cdot dt - Q \cdot (K - K_0) dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

t=0의 경우, K=K<sub>1</sub>의 초기 조건하에서의 식은

$$K = K_0 + (K_1 - K_0)e^{-\frac{Q}{V}t} + (W/Q) \cdot (1 - e^{-\frac{Q}{V}t}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

이 식에서 정상상태, t=∞인 경우에서의 식은

$$K = K_0 + (W/Q) \quad \dots\dots\dots (3)$$

K : 환기후의 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), K<sub>0</sub> : 외기중의 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), K<sub>1</sub> : 실내의 초기 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), W : 실내에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), Q : 환기량(m<sup>3</sup>/h), V : 실용적(m<sup>3</sup>), t: 시간(h)을 뜻한다.

본 연구에서는 일반적인 실내 CO<sub>2</sub> 농도 예측 식 (3)을 이용하여 고속선 운행구간에서의 실내 CO<sub>2</sub> 예측 식 (4)를 제안하였다.

$$K = K_0 + (W/Q) \pm (An \times B) \quad \dots\dots\dots (4)$$

K : 환기후의 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), K<sub>0</sub> : 외기중의 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), W : 실내에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 농도(m<sup>3</sup> · CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>), Q : 환기량(m<sup>3</sup>/h), (An × B) : 플랩의 열림(또는 닫힘)시 CO<sub>2</sub> 증감량을 뜻한다.

상기 식 (4) 좌변의 K<sub>0</sub>는 ASHRAE Handbook[10] 에 일반적인 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도로 제시하고 있는 350 ppm으로 초기 실내와 대기농도는 같다고 가정하였다. W 는 승객 1인당 발생하는 CO<sub>2</sub> 농도로, 유재홍[13] 이 승객 1인당 호흡할 때 배출되는 CO<sub>2</sub> 값으로 제시한 평균 0.013 m<sup>3</sup>/h(의자에 앉은 상태)를 적용하였다. Q 는 KTX 1량의 환기량(= 1200 m<sup>3</sup>/h)을 뜻한다. 그리고 식 (4) 우변의 (An × B)는 KTX가 고속선 운행 중에 터널을 인식하고 플랩이 닫히거나 터널을 통과한 이후에 플랩이 다시 열릴 때 1분당 각각의 평균치를 산정하고, 이를 카운트한 수로 나누어 평균치를 구한 결과는 표 1에 나타내었다. 터널 통과 전과 통과 이후에 플랩이 닫히고 열림에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도 증감은 1분당 6.32 ppm으로 계산되었다. 플랩의 열림(또는 닫힘)시 CO<sub>2</sub> 증감량을 계산하기 위해 측정된 데이터를 이용하였다. 측정치는 2006년 7월18일 ~ 7월19일(경부선, 서울→부산), 7월24일 ~ 7월25일(호남선, 용산→목포), 9월5일(경부선, 부산→서울), 11월20일(경부선, 동대구→서울), 2008년 5월7일(경부선, 대전→부산) 측정치를 이용하였다[1,2].

환경부에서 제시하고 있는 CO<sub>2</sub> 농도 Level 1(정상시)은 2,000 ppm이다. 열차가 출발해서 최종 도착역까지 측정치의 평균값으로 제시하고 있다. 일부구간을 제외하고 전체적으로 가이드라인에 만족한 수준으로 나타났으나, 승객수와 터널의 영향이 있음을 확인 할 수 있다.

BECHTEL[5]에서 제시하는 예측 모델을 이용하기 위해서는 별도의 KTX 동력차에 위치한 ATESS레코드 기록파일을 분석하여야만 가능하였다[1]. 터널 구간의 운행구간에서 영향을 주는 주요 터널구간을

파악할 수 없기 때문에 예측방법을 활용하기에는 어려움이 있다.

KTX의 운행 특성상 차체에 설치되어 있는 플랩의 작동과 승객수의 영향에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 예측으로, BECHTEL 예측 모델은 KTX 동력차에 위치한 ATESS기록과일을 분석하지 않으면, 터널 통과 및 운행관련 정보를 알 수 없기 때문에 예측에 어려움이 있다. 표 1과 그림 1과 같이 터널의 통과시점과 KTX 차체에 설치되어 있는 플랩의 열림과 닫힘에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 증감량을 적용하여 쉽게 예측이 가능하였다. 특히, F1지점은 광명역을 출발하여 일직터널에서 송라터널까지, F2지점은 고등에서 상봉터널까지, F4지점은 오탄터널에서 화신타널까지 장대터널과 터널 연속구간이다.

고속선 운행구간에서의 실내 CO<sub>2</sub> 농도 예측의 적합성 검토를 위한 검증 지표로는 여러 가지가 있으나 평균제곱근 오차(RMSE: Root Mean Square Error)를 일반적으로 사용하고 있다. 여기서, 평균제곱근 오차(RMSE)와 퍼센트 평균제곱근오차(%RMSE)를 실측치와 예측치의 오차과약을 위해 식 (5)와 (6)을 이용하였다. RMSE와 %RMSE의 수치가 낮을수록 예측치가 실측치를 잘 설명한다고 할 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (t_i - T_i)^2}{N}} \dots\dots\dots (5)$$

$$\%RMSE = \left(\frac{RMSE}{T_e}\right) \times 100 \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $t_i$  : 링크  $i$ 의 배정된 예측치,  $T_i$  : 링크  $i$ 의 실측치,  $N$  : 링크수,  $T_e$  : 실측 링크치의 평균이다.

표 1. 플랩작동에 따른 CO<sub>2</sub> 증감량

			평균 CO <sub>2</sub> ÷ 데이터 수(N)	평균 CO <sub>2</sub> (A+B+C)	증감량 (플랩 열림) - (플랩 닫힘)
플랩 닫힘	Jul. 18th. 2006 (N=44)	A	1557.0±330.1 = 35.38	35.54	6.32
	Jul. 19th. 2006 (N=50)	B	1413.9±356.6 = 28.27		
	Sept. 4th. 2007 (N=45)	C	1933.8±401.3 = 42.97		
플랩 열림	Jul. 18th. 2006 (N=39)	A	1633.6±386.4 = 41.88	41.86	
	Jul. 19th. 2006 (N=41)	B	1448.9±335.3 = 35.33		
	Sept. 4th. 2007 (N=40)	C	1935.9±398.5 = 48.39		

표 2. 광명역에서 동대구역간 주요 터널 통과시점

구분	터널지점	평균 소요시간(분)
F1	일직터널 ~ 송라터널	6
F2	고등터널 ~ 상봉터널	5
F3	궁현터널 ~ 시목터널	3
F4	오탄터널 ~ 화신타널	5
F5	황학터널	3
F6	월곡터널 ~ 북삼터널	4
F7	석적터널 ~ 지천터널	3

터널에서의 KTX 플랩이 닫힘

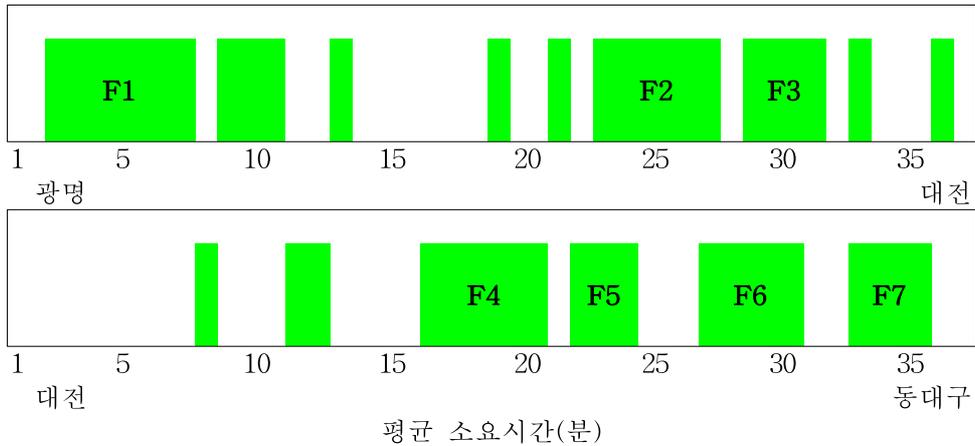


그림 1. KTX 운행 중 터널 연속 및 장대터널 통과시점(광명역→동대구역)

표 3. 플랩의 작동에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 증감량 산정을 위한 측정치와 예측치 비교

구 분	측정치 (평균값)	$An \times B$ (A : 4~9, n : 배수, B : 6.32)						
		case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	
(a)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1521	1355	1429	1504	1578	1652	1727
	%RMSE		12.26	8.68	7.35	9.68	13.46	17.65
(b)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1254	1199	1226	1254	1282	1309	1337
	%RMSE		10.52	9.01	9.03	9.60	11.09	12.62
(c)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1659	1373	1366	1361	1354	1347	1341
	%RMSE		18.05	18.28	18.48	18.87	19.19	19.51
(d)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1196	1065	1110	1155	1200	1245	1291
	%RMSE		11.63	8.16	5.89	5.90	8.06	11.15

(a) : Gwangmyeong → Daejeon (Sept. 4th. 2007)

(b) : Daejeon → Dongdaegu (Sept. 4th. 2007)

(c) : Daejeon → Dongdaegu (Jul. 19th. 2006)

(d) : Yongsan → Seodaeseon (Jul. 24th. 2006)

### 3. CO<sub>2</sub> 농도 예측 결과 및 고찰

KTX가 고속선 운행 중 터널에서의 외부 공기 유입과 차단에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도 증감량의 적정 변수를 산정한 결과는 표 3과 같다. Case 1은 4배수, Case 2는 5배수, Case 3은 6배수, Case 4는 7배수, Case 5는 8배수, Case 6은 9배수로 가정하여 실측치와 비교하여 Case 3의 6배수로 가정할 때에 %RMSE의 수치가 낮게 나왔다. 이를 변수로 적용하였다.

표 3 (a)는 광명역에 근접한 개착박스에서 대전역 도착 전에 위치한 신대터널까지의 구간이다. 승객수는 정원(56명)에 40명으로 71%수준이다. 실측치와 예측치의 적합도에 대해서 %RMSE로 비교한 결과, Case3(6n)의 경우 7.35%, Case2(5n)은 8.68%으로 나타났다. (b)는 대전역 출발 이후 중삼터널에서 동대구역 도착 이전인 석적터널까지의 구간이다. 승객수가 33명으로 정원에 58%수준이다. Case2(5n)의 경우 9.01%, Case3(6n)은 9.03%, Case4(7n)은 9.60%로 나타났다. (c)는 승객수가 33명으로 정원에 58%수준이다. Case1(4n)의 경우 18.05%, Case2(5n)은 18.28%, Case3(6n)은 18.48%, Case4(7n)은 18.87%순으로 나타났다. (d)는 각각 14.21%, 5.89%로 상대적으로 차이가 크게 나타났다.

고속선 운행구간에서 KTX가 차체 플랩 작동으로 실내 CO<sub>2</sub> 증감은 Case3(6n)의 증감변수를 적용하여 실내 CO<sub>2</sub> 예측식을 도출하였다. 이를 실제 측정치와 경부고속철도 건설 시 검토되었던 BECHTEL사의 예측 모델과 상호 비교하였다.

표 4. KTX 실내 CO<sub>2</sub> 농도 측정치, BECHTEL모델, 예측치 비교

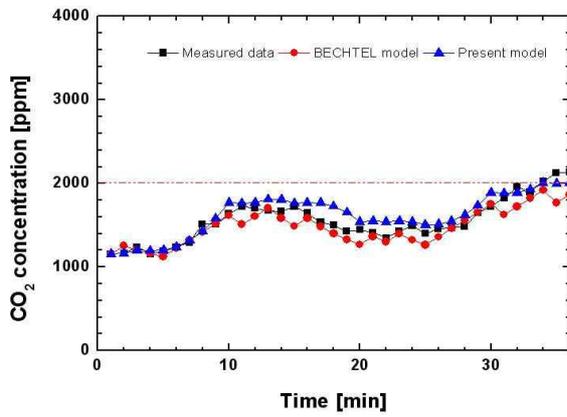
구 분		측정치(평균)	BECHTEL 모델	예측치
(a)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1555	1476	1621
	%RMSE		6.00	5.90
(b)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1254	1353	1254
	%RMSE		20.34	9.03
(c)	CO <sub>2</sub> (ppm)	1196	1055	1155
	%RMSE		14.21	5.89
(d)	CO <sub>2</sub> (ppm)	984	908	855
	%RMSE		8.97	13.16

(a) : Gwangmyeong → Daejeon (Jul. 18th. 2006)

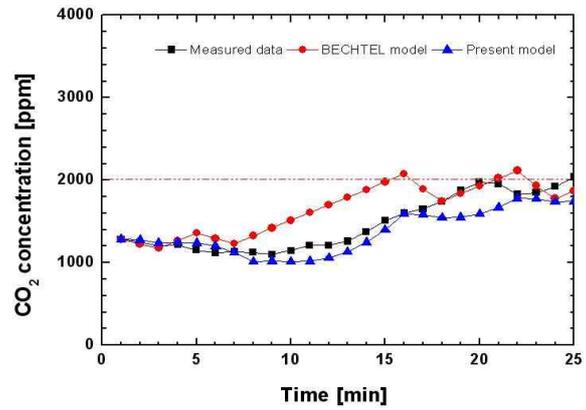
(b) : Daejeon → Dongdaegu (Jul. 19th. 2006)

(c) : Yongsan → Seodaejeon (Jul. 24th. 2006)

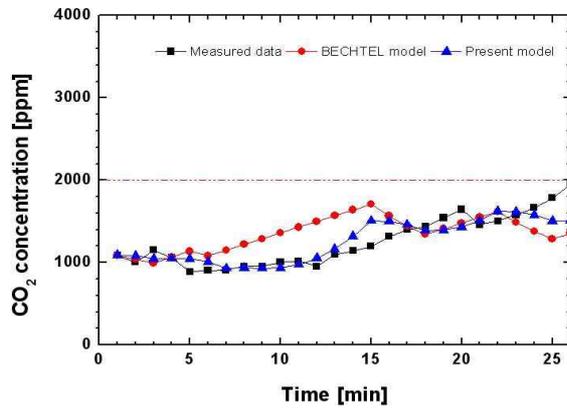
(d) : Yongsan → Seodaejeon (Jul. 25th. 2006)



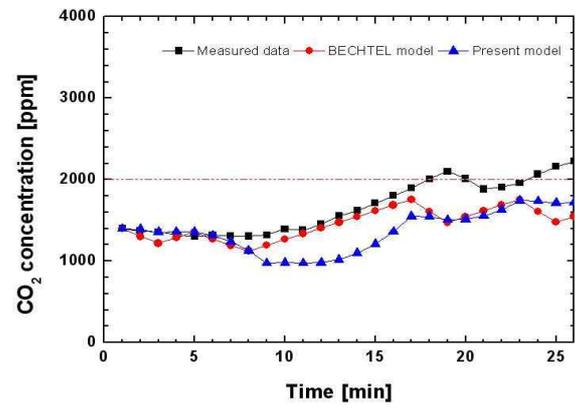
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. KTX 실내 CO<sub>2</sub> 농도 측정치, BECHTEL모델, 예측치 비교

표 4와 그림 2 (a)는 BECHTEL 모델에서 6%, 본 예측에서는 5.9%로 유사하게 나타났다. 9지점에서 짧은 터널을 운행하는 10지점과 15에서 18지점까지 외부에서 공기가 유입되어 충분한 환기가 이루어지다가, 19지점의 짧은 터널을 통과 후 20지점에서 다시 짧은 터널을 통과하는 21지점은 F2지점으로 고등 터널에서 상봉터널까지 약 5분이 소요된다. 그리고 25지점을 지나서 다시 터널이 이어지는 F3지점인 30지점은 궁현터널에서 시목터널까지 약 3분이 소요되는 터널 연속구간으로 나타났다. (b)는 각각 20.34%, 9.03%로 상대적으로 차이가 크게 나타났다. 외부에서 공기가 유입되어 충분한 환기가 8지점까지 이루어지다가, F4지점인 15지점부터 터널 연속구간인 오탄터널에서 화신타널까지 약 5분이 소요된다. 또한 20지점을 지나 짧게 터널을 빠져나온 후 다시 22지점부터 25지점까지 장대터널인 황학터널이 있는 F5지점은 약 3분이 소요되는 구간에서 %RMSE가 다소 높게 나타났다. (c)는 각각 14.21%, 5.89%로 상대적으로 차이가 크게 나타났다. (d)는 각각 8.97%, 13.16%로 상대적으로 차이가 크게 나타났다. 승객수가 26명으로 46%수준으로 낮을 때에는 실제 측정치와 BECHTEL 모델보다 본 예측에서 다소 높게 나타났다.

#### 4. 결론

KTX의 운행 특성상 차체에 설치되어 있는 플랩의 작동과 승객수의 영향에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도를 예측하였다. 기존의 BECHTEL 예측 모델은 KTX 동력차에 위치한 ATESS기록과일을 분석하지 않으면 터널 통과 및 운행에 관련된 정보를 알 수 없기 때문에 예측에 어려움이 있었다. 하지만 본 예측식은 일반적인 CO<sub>2</sub>농도 예측식에 KTX의 특성상 플랩의 열림과 닫힘에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 증감량만을 변수로 적용하여 쉽게 예측이 가능하도록 하였다. 플랩의 작동에 따른 실내 CO<sub>2</sub> 농도 증감은 1분당 6.32 ppm으로, 외부 공기의 공급과 차단시간이 1분을 초과하여 연속적일 경우, 1분당 6배수로 증감할 때에 유사한 결과를 보였다. 본 예측식은 실제 측정치와 기존의 BECHTEL사 예측 모델과 상호 비교한 결과, 승객수가 적거나, 터널의 환기시점이 짧은 상태에서 다시 터널을 통과 할 때, 터널길이가 긴 장대터널과 터널이 연속구간에서 환기를 하는 시점이 길어질 때에는 %RMSE가 다소 높게 나타났으나, 전체적으로 유사한 결과로 나타났다.

#### 참고문헌

1. 소진섭, 유성연, “터널구간 운행시 KTX HVAC-여압장치 작동에 따른 CO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub> 변화연구,” 한국철도학회 논문집, 제10권, 제6호, pp.1-7, 2007.
2. J.S.So, S.Y.Yoo, “A Research for the Indoor Air Quality Changes by Operating HVAC pressurization equipment in the Tunnel Sections,” 8th World Congress on Railway Research, Seoul KOREA, pp.262, 2008.
3. 소진섭, 객실 공기청정도 조사 분석 연구, 한국철도공사 연구원
4. 권순박, 조영민, 박덕신, 박은영(2006), “KTX 객실의 CO<sub>2</sub> 농도와 승객 수 및 터널구간과의 상관관계,” 한국철도학회 학술대회논문집, pp.192-195, 2006.
5. 한국고속철도건설공단, “Calculation of CO<sub>2</sub> Build-Up in Trailer Car Passenger Areas,” BECHTEL, pp.6-8, 1996
6. 소진섭, 유성연(2008), “전동차 실내공기질 측정 및 CO<sub>2</sub> 농도 예측,” 한국철도학회 논문집, 제11권, 제4호, pp.378-383, 2008.
7. 정광섭, 김광우, 안병욱, 박병윤, 이정재, 방승기, 김수빈, 정용호 편역, 건축공기조화설비, 성안당, pp.324-328, 2003.
8. 박미진 역, 실내공기오염의 메카니즘, 도서출판 동화기술, pp.17, 2001.
9. 이정재, 금종수, 도근영, 김상진, 김종민, 김환용, 이선영, 박희욱, 김재돌, 김용경 편역, 건축환경공학, 시그마프레스(주), pp.229-237, 2004.
10. ASHRAE Fundamentals Handbook, Environmental Control for Animals and Plants, pp.25, 1994.
11. 日本工業規格, 室内換氣量測定方法(炭酸ガス法), JIS, A 1406, pp.2, 1997.
12. 임만택, 건축환경학, 도서출판 보문당, pp.332-337, 2006.
13. 유재홍, “지하철내의 CO<sub>2</sub>측정을 통한 적정환기량 산정에 관한 연구,” 석사학위논문, 서울시립대학교, 1997.
14. Chow, W. K, “Ventilation of Enclosed Train Compartments in Hong Kong, Applied Energy,” Vol. 71, pp.161-170, 2002.
15. Yasuo ZENDA, “Study on the Ventilating System of Shinkansen Vehicle by Simulating the Internal Pressure,” RTRI REPORT, Vol. 2, No. 12, 1988.