

## P4a 분배밸브를 사용하는 화물열차의 경험적 제동모델들의 비교

최돈범\*, 김민수, 이강미, 김영국  
한국철도기술연구원

### Comparisons of Empirical Braking Models for Freight Trains Using P4a Distribution Valve

Don Bum Choi\*, Min-Soo Kim, Kangmi Lee, Young-Guk Kim  
Korea Railroad Research Institute

**요약** 본 논문은 국내 고속형 화물열차에 적용되는 P4a 분배밸브를 갖는 화물열차의 장대 편성시 제동특성에 관한 것이다. 제동신호가 열차의 끝단까지 연결된 제동관을 통해 공기압력으로 전달되는 화차의 제동은 열차 길이와 사용된 밸브 등에 따라 영향을 받기 때문에 실험적 방법으로 확인한다. 장대화물 열차의 제동 특성은 평상시 운영의 약 2배인 50량으로 구성된 화물열차의 비상제동과 상용제동의 시험을 이용하였다. 1, 10, 20, 30, 50번째 차량에서 제동 실린더 압력이 측정되었다. 열차의 길이가 길어질수록 후방의 차량은 제동이 늦게 체결되는 제동지연 현상을 확인하였으며 특히 비상제동시 차량간 충격이 클 것을 예상할 수 있었다. 제한된 시험의 결과를 보완하고 향후 제동거리 계산을 위해 열차를 구성하는 모든 차량에서의 제동 압력을 예측할 필요가 있다. 제동시 각 차량에서의 압력은 계산시간의 단축과 신뢰성 있는 정보를 제공하는 것으로 알려진 선형보간, 단계형, 지수함수형의 경험적 모델들을 이용하여 예측하였다. 경험적 모델들의 예측결과는 실측한 결과들과 비교하였으며 지수함수형 모델이 비교적 정확하게 예측하고 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 장대화물열차의 안전한 운용에 기여하고 화물열차의 제동거리 예측과 제동시 차량간 충격량 계산 등에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

**Abstract** This study examined the braking characteristics of a heavy haul freight train with P4a distribution valves applied to domestic high-speed freight trains. A freight train was composed of 50 cars, which is twice the normal operation. A braking test was performed to confirm the characteristics of the braking of a heavy haul. The brake cylinder pressures were measured for emergency and service braking on the 1st, 10th, 20th, 30th, and 50th cars. Because the brake signal is transmitted to the pressure through the braking tube connected to the end of the train, the rear vehicle is braking later than the vehicle ahead. Therefore, it is necessary to predict the brake pressures in all cars in a train to supplement the results of the limited tests and calculate the braking distance. The pressure in each car was determined using empirical models of linear interpolation, stepwise, and exponential models, which provided reliable information. The predictive results of the empirical models were compared with the measured results, and the exponential model was predicted relatively accurately. These results are expected to contribute to the safe operation of heavy haul freight trains and can be used to predict the braking distance and calculate the level of impact between vehicles during braking.

**Keywords** : Brake Pressure, Heavy Haul, Freight Train, P4a Distribution Valve

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Don Bum Choi(Korea Railroad Research Institute)

email: eye@krrri.re.kr

Received October 21, 2019

Revised December 13, 2019

Accepted January 3, 2020

Published January 31, 2020

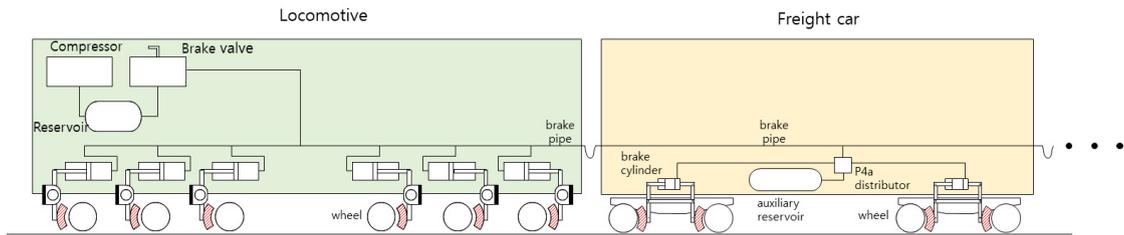


Fig. 1. Schematic diagrams of braking system of locomotive and freight car of train

### 1. 서론

국내 통상의 화물철도 편성은 25량 이내의 범위에서 운영되고 있지만 최근 장대화물열차에 대한 관심의 증대와 함께 대륙철도 운영 등 대량 화물수송에 대한 관심이 높아지고 있다[1,2]. 화차의 제동신호 전달은 기관차부터 차량의 끝단까지 연결된 제동관(brake pipe)을 이용한다. 기관차의 압축기에서 생성된 압축공기는 배관을 통해 각 차량에 공급된다. 기관차가 제동을 체결하면 제동배관의 압력이 감소하게 되고 이를 감지한 차량부터 제동이 시작된다. 제동관의 압력은 기관차부터 순차적으로 감소하며 결과적으로 열차 전체가 제동이 체결된다. 제동신호가 순차적으로 전달되기 때문에 열차의 길이와 적용된 밸브류에 따라 차량간 제동 지연시간이 있으며 열차 전체가 제동이 체결되기까지는 수 초가 소요될 수 있다 [3-5]. 제동 지연시간과 압력상승 양상은 제동거리에 영향을 줄 뿐 아니라 차량들 사이의 충격, 연결기 파손이나 차량 탈선을 유발할 수 있다[2-4].

본 연구에서는 P4a 분배밸브를 사용하는 제동시스템이 적용된 화차들을 50량으로 편성한 열차에 대하여 측정된 제동실린더의 압력을 이용하고 경험적 제동모델들을 적용하여 비교하였다. P4a 분배밸브를 사용하는 제동시스템을 합리적으로 예측하는 경험적 모델은 향후 많은 시간과 비용이 소요되는 실차 시험을 대체하고 향후 제동거리 예측 및 연결기 충격량 계산의 입력 자료로 활용하고자 한다.

### 2. 화차의 제동장치

공압식 방법을 이용하는 철도차량의 제동시스템에서는 하중에 관계없이 일정한 제동거리를 유지하기 위하여 하중에 따라 제동압력을 제어한다. 압력제어 방식은 2단

(공차/영차) 제어방식과, 연속 제어방식으로 구분할 수 있다. 2단 제어방식은 화물 운송이 영차 또는 공차 상태로 주로 사용되는 유조화차, 양회화차에 적용된다. 연속 제어방식은 도시철도차량이나 컨테이너 화물 수송과 같이 다양한 하중의 경우에 사용될 수 있으며, 주로 현가장치의 눌림량을 이용하여 제어한다[6]. 국내 화차에서의 막판식 제동장치는 Table 1에서와 같이 2단 제어를 하는 KRF-3형과 연속제어를 할 수 있는 P4a형으로 구분할 수 있다[7]. 연속 제어방식은 최근 도입되는 화차에 사용되며 향후 국내 화물열차의 주를 이룰 것으로 보고 있고[4,8] 본 연구에서도 P4a 제어밸브를 사용하는 제동장치를 중심으로 분석 한다.

Table 1. Distribution valves and braking force control

Distribution valve type	Braking force control
KRF-3	2 stage control (empty, full)
P4a	stepless control

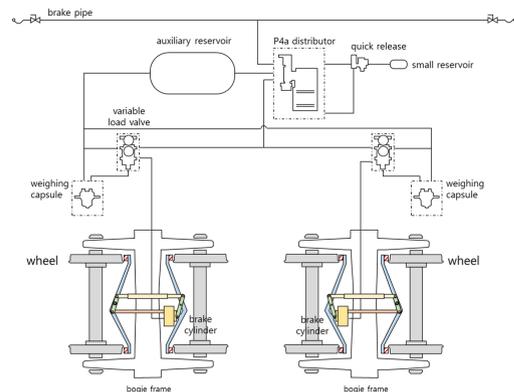


Fig. 2. Freight car braking diagrams using P4a distribution valve

화차에 적용되는 압축공기 제동시스템에 대한 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 기관차에는 기관사가 필요에 따라 제동을 작동시키는 제동밸브(brake valve)와 압축기(compressor)가 있다. 열차를 구성하는 차량들의 끝단까지 제동관(brake pipe)으로 연결된다. 기관사의 제동밸브 작동에 따라 제동관의 압력이 낮아지고 이를 감지한 차량부터 제동이 체결된다.

화차에는 제동관의 압력 감소를 감지하고 제동실린더에 압축공기를 공급하는 분배밸브가 차량마다 설치된다. 차량에 설치된 P4a 분배밸브를 사용하는 제동장치의 개요도를 Fig. 2에 나타내었다.

제동은 사용에 따라 충기, 제동, 완해의 단계로 구분할 수 있다[9]. 충기 단계는 기관차의 제동밸브(brake valve)를 충기 위치로 하면 압축기(compressor)에서 제동관을 통해 압축공기가 차량들로 공급되며 P4a 분배밸브를 거쳐 보조공기통(auxiliary reservoir)의 압력이 상승한다. 보조공기통의 압력은 변동하중 밸브와 연결되며 제동을 체결할 수 있는 준비 상태가 된다. 제동 단계에서 기관차의 제동밸브를 제동위치로 하면 제동관 압력이 감소하게 되고 분배밸브를 통해 보조공기통의 압력이 부하 감지 밸브의 부하에 비례한 제동압력이 제동실린더로 공급된다. 제동 실린더는 마찰재가 차륜에 직접 접촉하도록 하여 제동이 체결된다. 완해 단계는 제동밸브를 완해로 위치시키면 제동관의 압력이 다시 상승하기 시작하며, 각 차량의 보조공기통의 압력이 상승하게 된다.

화차에서는 제동신호의 전파가 제동관의 압력으로 전달되기 때문에 기관차로 부터 멀어지는 차량들 순서로 순차적 제동이 체결된다. 따라서 제동이 시작된 직 후에는 제동이 체결된 차량과 아직 제동신호가 전달되지 않은 차량들 사이에 충격이 발생할 수 있다. 국내의 화차 운행시 연결기 손상이 발생하는 원인으로 차량간 제동 지연으로 추정하고 있다[2].



Fig. 3. Freight train brake test bench

### 3. 편성시 공기제동 특성의 측정

편성된 열차의 제동 측정은 실제로 열차를 구성하여 측정하는 방법이 있으나, 특히 많은 차량을 구성하기 어렵거나 실차시험은 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 편성제동 성능시험기가 사용될 수 있다[7]. 편성시험기의 예시를 Fig. 3에 나타내었다.

편성제동 성능시험기는 차량에 사용된 동일한 밸브류를 축소된 공간에 배치하여 제동장치의 특성과 성능을 검증할 수 있는 장치이다. 그러나 동일한 밸브를 사용했더라도 공간적 제약으로 차량에 사용된 배관이나 피팅(fitting)류들이 동일하게 적용되기 어렵다. 편성시험에 대한 국내 운영 규격에서는 배관의 길이만을 차량과 동일[7]하도록 하였기 때문에 실제 열차에서의 특성과 다를 수 있다. 따라서 시험기의 배관은 차량에 적용된 배관이나 피팅류들의 특성이 유체역학적으로 평가하고 이를 반영한 상당배관(equivalent pipe)으로 구성되어야 한다.

제동특성 분석을 위하여 P4a 밸브가 사용된 화차 50량으로 구성된 열차 시험[4,8]을 이용하였다.

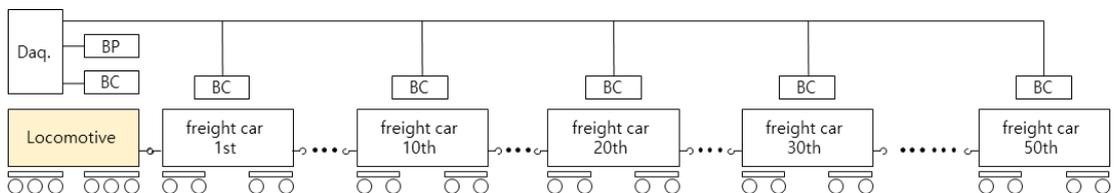


Fig. 4. Brake pressure test diagram configurations with 50 freight cars

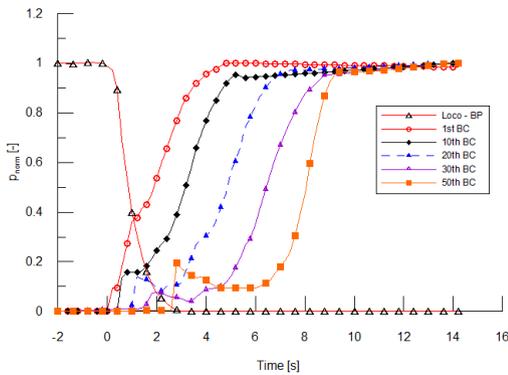


Fig. 5. Changes in pressures over time (emergency brake)

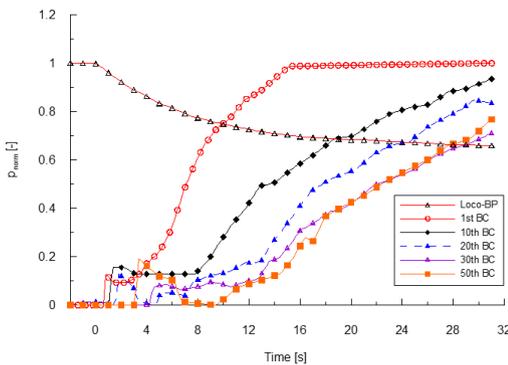


Fig. 6. Changes in pressures over time (service brake)

시험에서는 Fig. 4에서와 같이 일반적인 조성의 2배인 50량의 화물차량들을 열차로 구성하고, 정차한 상태에서 비상제동과 상용제동의 시험을 수행하였다.

기관차에서는 제동관, 제동실린더에서의 압력을 측정하고 화차에서는 1, 10, 20, 30, 50번째 차량에서 제동실린더의 압력을 측정하였다.

P4a 분배밸브를 사용하는 경우 화물의 적재 중량에 따라 비례적으로 제동압력을 제어하기 때문에 차량마다 동일하지 않을 수 있다. 따라서 식(1)과 같이 제동 최대 압력으로 정규화(Normalizig)한 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다.

$$p_{norm} = \frac{p}{p_{max}} \quad (1)$$

Fig.5에서와 같이 비상제동시에는 제동관의 압력이 급격히 낮아져 각 차량에서는 순차적으로 제동실린더의 압력이 상승된다. 50번째 차량은 첫번째 차량이 제동이 완전히 체결된 약 5초 후에 제동이 체결되기 때문에 먼

저 제동이 체결된 차량에 충격을 줄 수 있음을 확인할 수 있다. 또한 차량간 압력상승 양상은 마지막 차량을 제외하고 비슷한 압력 상승의 양상을 나타내었다. 마지막 차량에서의 압력양상은 [10]의 결과와 유사하며 [11]에서는 압력 천이과정으로 분배밸브의 내부 마찰과 히스테리시스 특성[12]으로 보았으나 이에 대한 상세한 영향과 특성 분석은 향후 보완되어야 할 것으로 보인다.

상용제동과 비상제동의 차이는 최대 제동압력에서 차이가 나는 것이 아니라 제동시간을 제어하는 방식으로 제어된다.

상용제동의 시험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 상용제동에서는 제동관의 압력이 느리게 낮아지며 차량에서는 제동 지연 현상이 발생한다. 최대 압력에 도달하는 시간은 각 차량별로 차이가 있지만 첫 번째 차량에서는 비상제동에 비해 약 3배 정도 늦게 상승하였다. 차량들간 제동 압력은 크기다 다르고 압력상승이 시작되는 시간 차이는 작을 것으로 예상된다. 제동시 차량간 충격은 비상제동에 비해 작을 것으로 예상되지만 비상제동은 시작 시간의 차이가, 상용제동에서는 제동압력의 크기가 주요 영향 요소일 것으로 예상된다.

#### 4. 경험적 제동모델의 적용

제동압력 분석의 목적 중 하나는 열차의 제동거리를 예측하는데 있다. 제동거리를 예측하기 위해서는 열차를 구성하는 모든 차량에서의 제동압력 변화를 알아야 한다[13,14].

모든 차량에서의 제동특성을 측정하는 실험적 접근 방법은 열차를 구성하기 어렵거나 많은 시간과 비용이 소요될 때 유체역학적 모델과 경험적 모델을 통해 보완될 수 있다[5].

유체역학적 모델은 배관과 밸브류와 같은 차량의 제동 시스템을 물리적으로 모델링하고 유체역학적 해석을 수행하는 방법이다. 알려지지 않은 제동시스템의 경우 유용하지만 모든 구성요소를 모델링하고 검증해야 하는 어려움을 갖고 있다.

경험적 방법은 선형보간형, 단계형, 지수함수형으로 구분할 수 있으며, 제한된 측정된 결과를 모든 차량으로 확장하는 방식이다. 특정 제동시스템에 적용할 수 있다는 한계를 갖지만 계산시간이 짧고 높은 신뢰도의 정보를 제공하는 장점이 있다.

본 연구에서는 실차 시험을 통해 확보한 제동 압력의

변화를 바탕으로 경험적 방법을 통해 차량에서의 압력변화를 예측하고 시험결과와 비교하였다.

### 4.1 선형 보간형 모델

선형 보간모델은 차량의 위치에 따라 선형적으로 접근하는 방식으로 열차를 구성하는 첫번째 차량과 마지막 차량에서 제동 압력을 측정하고 차량의 위치에 따라 식 (2)의 선형 보간을 적용한다.

$$p_i = \frac{ip_1 + (N-i)p_N}{N} \quad (2)$$

위 식에서  $p_i$ 는 기관차로부터  $N$ 량으로 구성된 열차에서  $i$ 번째 위치한 차량에서의 제동 실린더 압력,  $p_1$ 은 첫번째 차량의 제동실린더의 압력,  $p_N$ 은 열차를 구성하는 마지막 차량에서의 압력을 의미한다. Martin 등[15]은 150량의 공기제동 화차에 적용한바 있으며, 동역학 해석 상용 프로그램인 UM[16]에서도 사용되고 있다. 선형 보간 방법을 적용한 비상제동과 상용제동의 결과를 Fig. 7 과 8에 각각 나타내었다. 선형 보간법은 요구되는 시험과 적용이 간단하지만 시간지연을 고려할 수 없다. 특히 비상제동에서의 마지막 차량에서의 압력 특성이 중간 차량들에서 과도하게 예측하는 특성을 보였다.

### 4.2 단계형 모델

시간 지연을 고려하기 위한 모델로 단계식 제동압력 모델이 있다. Grebenyuk는 식(3)와 같이 길이에 따라 지연, 압력상승, 최대압력의 세 단계로 나누는 방법을 제안하였다. 이때 압력 상승에 소요되는 시간은 일정하다고 가정하였으며 압력 상승은 지수함수적인 관계에 있다고 가정하였다[17-19].

$$p_i = \begin{cases} 0 & t \leq \frac{x_i}{L}t_1 \\ p_{\max} \left( \frac{t - (x_i/L)t_1}{t_2} \right)^\delta & \frac{x_i}{L}t_1 < \frac{x_i}{L}t_1 + t_2 \\ p_{\max} & \frac{x_i}{L}t_1 + t_2 \leq t \end{cases} \quad (3)$$

여기서,  $p_i$ 은 열차의 선두로부터  $x_i$  지점에 위치한 차량의 제동 실린더 압력,  $L$ 은 열차의 전체 길이,  $t_1$ 은 마지막 차량의 압력 상승시작,  $p_{\max}$ 는 최대도달 압력,  $t_2$ 는 압력 상승에 소요된 시간,  $\delta$ 는 제동장치의 종류에 따른 특성 상수이다.

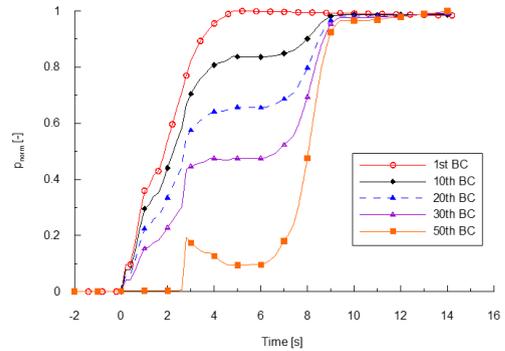


Fig. 7. Predicted pressures using linear interpolaton method (emergency brake)

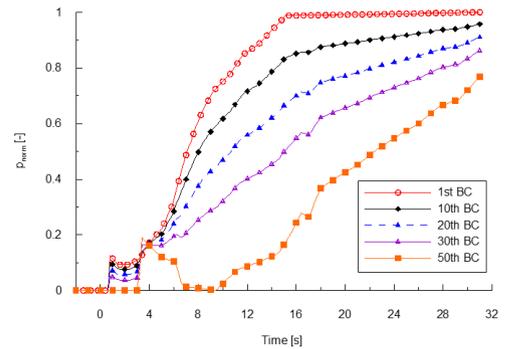


Fig. 8. Predicted pressures using linear interpolaton method (service brake)

단계식 제동압력 모델을 적용한 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. 차량의 위치로 환산하기 위하여 화차 1량의 길이는 일반 컨테이너 화차의 13.7m가 적용되었다.

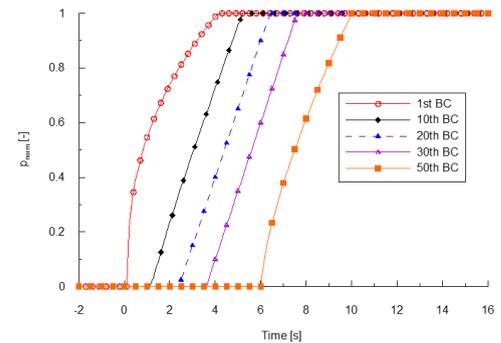


Fig. 9. Predicted pressures using 3 step model (emergency brake)

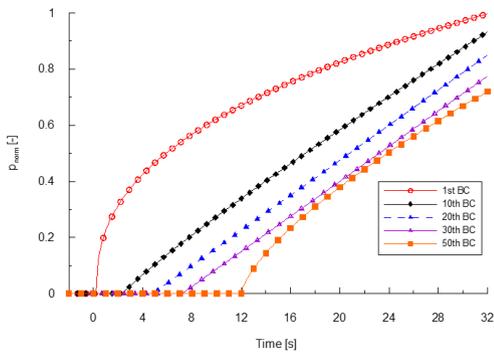


Fig. 10. Predicted pressures using 3 step model (service brake)

### 4.3 지수함수형 모델

지수함수식 모델은 단계형 모델과 같이 제동압력 상승 시작시간을 반영하며 식 (4)와 같이 압력상승을 지수 함수를 이용하여 모사한다. 지수함수적 모델은 제동압력을 제동력으로 환산하여 단일 차량에 적용되거나 단계적 제동의 특성분석에 사용되었다[20,21].

$$p_i = \begin{cases} 0 & t - t_r < 0 \\ p_{max} [1 - e^{-\delta(t-t_r)}] & t - t_r \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서,  $p_i$ 는 열차를 구성하는 각 차량에서의 제동압력,  $p_{max}$ 는 제동시 달성하는 최대 제동압력,  $t_r$ 은 제동압력이 상승하기 시작하는 시간,  $\delta$ 는 제동시스템에 따른 특성 변수를 각각 의미한다.

제동압력이 상승하기 시작하는 시간과 제동특성 변수를 분석하기 위하여 시험결과를 이용하여 특성을 분석하였다. 회귀분석을 통한 차량의 위치에 따른 비상제동과 상용제동의 제동지연시간, 특성변수를 Fig. 11과 12에 나타내었다.

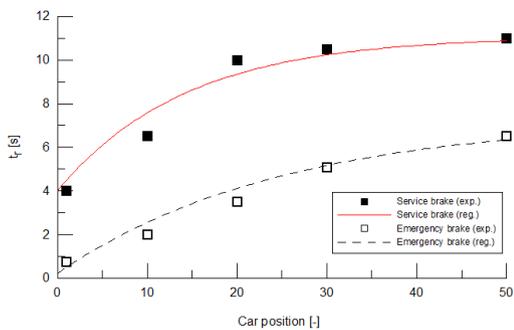


Fig. 11. Starting time of braking pressure rise according to the position

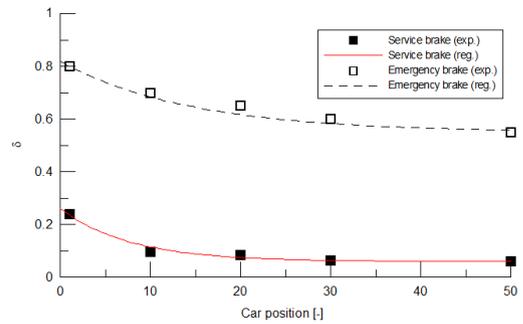


Fig. 12. Brake pressure rising characteristic factor according to the position

차량 위치에 따른 시간지연과 특성변수를 반영한 지수함수적 모델을 이용하여 비상제동과 상용제동의 압력 상승을 산출하여 Fig. 13과 14에 나타내었다.

비상제동에서는 마지막 차량에서의 제동특성을 반영할 수 없었지만 각 차량의 위치에서 비교적 유사한 예측을 나타내었다.

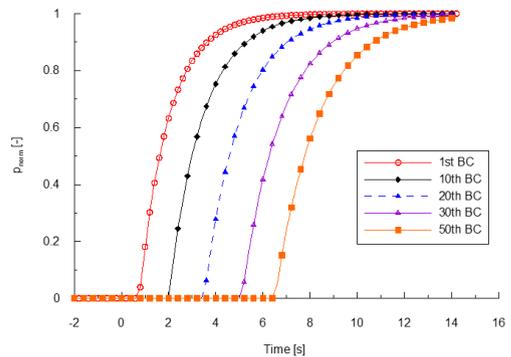


Fig. 13. Predicted pressures using exponential function model (emergency brake)

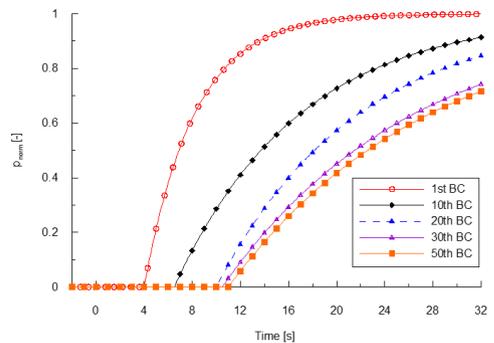


Fig. 14. TPredicted pressures using exponential function model (service brake)

#### 4.4 실측결과 값과의 오차분석

각 차량에서 실측한 압력변화와 경험적 모델들을 이용한 추정 압력간의 정확도 확인을 위하여 식 (5)의 편차 제공의 평균을 이용하여 오차를 측정하였다.

$$f_{error} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [p_k - \hat{p}_k]^2 \quad (5)$$

여기서,  $p_k$ 는 차량 위치에서 실험을 통해 측정된 압력 값들을,  $\hat{p}_i$ 는 경험적 모델들을 통해 추정 압력 값을 의미하며  $n$ 은 비교한 샘플링 개수를 의미한다. Table 2와 3에는 비상제동과 상용제동의 오차를 각각 나타내었다.

선형 보간모델은 첫번째 차량과 마지막 차량의 측정된 압력을 선형적으로 이용하기 때문에 첫번째와 마지막 차량의 오차는 작았지만 중간 차량에서 오차가 다른 모델에 비해 상대적으로 컸다. 단계적 모델과 지수함수 모델은 차량의 위치에 따라 오차가 달랐지만 비상과 상용제동의 모두의 경우에서 전체적으로 지수함수형 모델이 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Error analysis results of estimated brake pressure (emergency brake)

car position	linear interpolation model	3 step model	exponential function model
1	0	0.0067	0.0024
10	0.0095	0.0022	0.0040
20	0.0311	0.0031	0.0039
30	0.0312	0.0101	0.0020
50	0	0.0076	0.0072
SUM	0.0718	0.0297	0.0195

Table 3. Error analysis results of estimated brake pressure (service brake)

car position	linear interpolation model	3 step model	exponential function model
1	0	0.0067	0.0024
10	0.0095	0.0022	0.0040
20	0.0311	0.0031	0.0039
30	0.0312	0.0101	0.0020
50	0	0.0076	0.0072
SUM	0.0718	0.0297	0.0195

### 5. 결론

본 연구에서는 국내 고속화차에 적용되며, 적재 하중

에 따라 비례적으로 제동압력을 제어하는 P4a 분배밸브를 사용하는 화차의 제동특성에 대해 검토하였다.

평상시 편성의 2배로 구성된 50량 화물열차를 정차 상태에서 비상제동과 상용제동이 작동되었으며 제동실린더의 압력은 1, 10, 20, 30, 50번째 차량에서 시간에 따라 측정되었다. 대표적 차량 위치에서 측정된 결과를 경험적 제동모델들을 이용하여 모든 차량으로 확장 예측하고 시험을 통한 결과와 비교하였다.

시험 결과 분석을 통해 비상제동은 차량간 압력상승 패턴은 유사하지만 제동 시작 시간에서 뚜렷한 차이를 보였으며 상용제동은 압력상승이 후방 차량으로 갈수록 압력 상승이 늦어지고 후방부의 차량은 거의 유사한 압력 상승 특성을 보였다. 따라서 제동시 차량간 충격은 비상제동에서 가장 취약할 것으로 판단된다.

제동거리와 차량간 충격 예측을 위해 모든 차량에서의 제동특성을 알아야 한다. 시험 결과를 이용하는 대표적인 3가지 경험적 제동모델(선형보간, 단계적, 지수함수)을 이용하여 모든 차량으로 확장 예측하였다.

선형적 모델은 적용하기 간단하고 필요한 측정 정보가 적지만 각 차량에서 발생하는 제동시작 시간의 차이를 모사하기 어려우며, 단계적 모델에서는 압력상승 시간이 일정하다고 가정하였기 때문에 상용제동에서 차이를 보였다. 경험적 모델들을 이용한 예측 결과는 시험 결과와 편차 제공의 평균을 이용하여 비교하였다. 비상제동에서는 열차의 전반부 차량에서는 단계적 모델이, 후반부 차량들에서는 지수함수 모델이 오차가 적었다. P4a 분배밸브를 사용하는 제동 예측을 위해서는 지수함수 모델이 가장 적절할 것으로 예상된다.

본 연구의 결과는 장대화물열차의 운용 및 대륙철도 연결시의 제동시스템의 분석 등에 활용될 수 있으며 편성제동 성능시험기의 설계와 화물열차의 제동거리 예측 등에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

### References

- [1] Ministry of Land Infrastructure and Transport, "A study about cargo transportation system and transshipment optimization for technology for a connection of railway between North and South Korea and Northeast Asia continent (final report)", 2015
- [2] Jeong Jun Lee, Jeong Seo Koo, Byung Jin Cho, Hee Seung Na, Hyung Seok Mun, "Analysis and Evaluation of Reduction of Impact Force in a Coupler when a Long Freight Car Brakes", *The Korean Society of*

- Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp.130-137, 2018  
DOI : <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.1.130>
- [3] US Government Accountability Office, "Train Braking: DOT's Rule making on Electronically Controlled Pneumatic Brakes Could Benefit from Additional Data and Transparency", 2016
- [4] D.K.Lee, S.W.Park, G.Y Lee et al, "Brake system characteristics analysis in domestic long freight train configuration", pp.359-362, *The Korean Society for Railway*, 2017
- [5] Qing Wu, Maksym Spiryagin, Colin Cole, "Longitudinal train dynamics: an overview", *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, pp.1688-1714, 2016  
DOI : <https://doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988>
- [6] K.J.Choi, S.B.Lee et al., "A study on the brake performance improvement of rolling stock", 1995
- [7] Korean Railway Standards, "KRS BR 0011-17(R), Diaphragm Type Brake Equipment for freight car", 2006
- [8] Dong kyun Lee, Sang woo Park, Pyung woo Shin, Gunyub Lee, Hyung Suk Mun, "Characteristic analysis of the freight train brake system for entering the continental railway", *Proc. of the Korean society for railway*, pp. 487-490, 2018
- [9] S.W.Nam, K.H.Moon, D.H.Lee et al., "Experimental Study on the Pneumatic characteristics of Diaphragm Type Brake System", *The Korean Society of Mechanical Engineers*, pp.706-711, 1999
- [10] Luca Pugi, Duccio Fioravanti, A.Rindi, "Modeling the longitudinal dynamics of long freight trains during the braking phase", *12th IFTOMM World Congress 2007*, pp.18-21, 2007
- [11] Marc Ehret, "Modelica library for the systems engineering of railway brakes", *The American Modelica Conference*, 2018  
DOI: <https://doi.org/10.3384/ECP18154236>
- [12] Tadeusz Piechowiak, "Pneumatic train brake simulation method", Vol.47, No.12, pp.1473-1492, 2009  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00423110802600946>
- [13] Don Bum Choi, Min-Soo Kim, "Analysis of pneumatic braking component effects and characteristics of a diesel electric locomotive", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.11, pp.541-549, 2018  
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.541>
- [14] Don Bum Choi, Sae-Chan Oh, Min-Soo Kim, "Analysis of braking characteristics of electric multiple unit for train control system", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19 No.12, pp.887-895, 2018  
DOI : <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.887>
- [15] G.C.Martin, W.W.Hay, "Method of analysis for determining the coupler forces and longitudinal motion of a long freight train", *University of Illinois*, 1967
- [16] UM, "Universal Mechanism 8.0 user manual, Chap.15 Longitudinal train dynamics", 2016
- [17] Grebenyuk PT, "Braking dynamics of heavy haul trains", Moscow: *Transport PublishingHouse*, 1977
- [18] Nasr A, Mohammadi S., "The effects of train brake delay time on in-train forces", *J. Rail Rapid Transit*, Vol. 224, pp. 523-534, 2010  
DOI: <https://doi.org/10.1243/09544097JRR306>
- [19] Mohammadi S, Nasr A., "Effects of the power unit location on in-train longitudinal forces during brake application", *International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing*, Vol. 5, pp.176-196, 2010
- [20] Kuzmina EL., "Choice of an optimal diagram for filling air brakes of a locomotive", *Vestnik VNIIZHT*, Vol. 4, pp.40-44, 1962
- [21] M.A. Murtaza, "Railway air brake simulation: an empirical approach", *Journal of Rail Rapid Transit*, Vol. 207, pp.51-56, 1993  
DOI: [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC.1993.207.226.02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC.1993.207.226.02)

최 돈 범(Don Bum Choi)

[정회원]



- 2002년 8월 : 포항공대 기계공학과 (석사)
- 2007년 8월 : POSCO 기계설비
- 2003년 11월 : 산업기계기술사
- 2016년 8월 : 아주대학교 기계공학과 (박사 수료)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 제동, 신호처리, 임베디드시스템

김 민 수(Min-Soo Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 (석사)
- 2003년 8월 : 숭실대학교 전기공학과 (박사)
- 2004년 2월 ~ 2005년 11월 : 세종대학교 연구교수
- 2005년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량 제동, 열차제어

이 강 미(Kangmi Lee)

[정회원]



- 2005년 : 충북대 전자
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량 제어, 철도차량 전장기술

---

김 영 국(Young-Guk Kim)

[정회원]



- 1984년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (공학박사)

- 1986년 ~ 1996년 : 대우중공업중앙연구소 선임연구원
- 1996년 ~ 1997년 : 한국고속철도건설공단 차량연구실 선임연구원
- 1997년 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원
- 2018년 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 형식승인팀장
- 차량기술사, 건설기계기술사, 소음진동기술사

<관심분야>

철도동역학, 시험평가·인증, 고속철도 인터페이스