

차량편성구성에 따른 고속화물열차의 추진 및 제동성능 분석 연구

A Study on the Propulsion and Braking Performance of the High Speed Freight Train with Composing the Rolling Stocks Formation

한 성 호^{*}
(Seong-Ho Han)

Abstract - Currently, logistics are in small quantities and in diverse forms, and the amounts are continuously increasing. Railway logistics however are losing their market share every year mainly due to low operation speed and loading time, which means the trucks are covering the most of the freights. In order to solve these situations, this paper proposed the high speed freight train as working multi-modality with other modes to make effective transshipment. The high speed freight train has maximum operation speed of 300km/h and electric power to run centralized power supply. There are large dual door system, bogie system covering fluctuating load of 15[ton], automatic loading device, ULD(unit load device) bed and ULD locking system in this freight rolling stock. We calculated the performance of powering and braking capacity for this train and proposed how many vehicles are composed of train set. The results in this paper can help to make a decision to define the technical specification of High-speed freight train for the efficiency of rail freight service.

Key Words : Railway logistics, High-speed freight train, Multi-modality, Powering and braking, ULD

1. 서 론

본 연구는 국내 철도화물이 주로 수송시간에 민감하지 않은 벌크화물이나 컨테이너를 수송하고 있는 반면 대부분의 고부가가치 화물은 공로로 수송되고 있는 현실을 개선하고자 수행하였다.

국내물류수송이 공로에 전격적으로 의존함에 따라 도로정체 심화, 온실가스 배출, 유가상승에 따른 물류비용 증가 등 높은 사회적 비용을 초래하고 있는 실정이다[1].

따라서 새로운 개념의 대형 국가 물류수송체계 도입을 위해 철도, 항공, 항만, 인프라 건설 및 운영, 물류기업 등 다양한 모드 섹터가 고속으로 상호 연계하는 철도물류 경쟁력 확보를 위한 연구개발이 절실히 요구되고 있다.

최근 외국의 경우도 200[km/h]이상의 고속선로에서 고속 화물열차를 운영하여 항공기 화물의 수송한계와 국가간 화물연계를 도모하고 있다. 대표적인 사례로서 프랑스 TGV Postal은 TGV 여객열차 차량편성 모델을 기반으로 1984년부터 최고운행속도 270km/h로 상업운행을 하고 있다[2]. 또한, 2006년부터는 기존 유럽고속철도 네트워크를 활용하여 300km/h이상의 속도로 화물을 수송할 수 있는 Euro Carex 프로젝트를 구상하고 있다[3]. 일본은 증대되는 물동량 처리를 위해 화물열차를 신간선열차에 적재하여 운송하는

“Train on Train(ToT)” 고속열차를 200km/h로 운용하고 있다[2, 3].

국내의 경우 고속컨테이너 화물열차는 2004년부터 수도권 화물수송 거점인 의왕 내륙컨테이너기지(ICD)와 부산 간을 경부선에서 운행하고 있다. 이 고속컨테이너 화물열차는 화물수송시간을 일반 화물열차보다 2시간 정도 단축하여 6시간으로 운행하고 있으며, 2008년부터는 전라선의 의왕 ICD~광양항구간도 운행하고 있다[1].

열차는 편성 당 25량으로 구성하여 기관차로 견인하고 있으며, 기존 화물열차의 운행속도인 시속 90km보다 30km 정도가 빠른 시속 120km로 운행하고 있다. 고속컨테이너 화물열차 운항으로 부산항과 수도권간의 수출입 컨테이너 화물의 철도수송이 하루 600TEU(Twenty-foot equivalent units) 이상 늘어난 것으로 분석되고 있다. 하지만, 고속컨테이너 화물열차 운행은 철도가 대량수송, 정시성, 안전성, 친환경성 등의 다양한 장점을 갖고 있음에도 불구하고, 상대적으로 도로 수송에 비해 수송시간 및 운임측면에서 경쟁력이 떨어지고 있다[1].

한편 KTX 고속여객열차의 경우는 2005년부터 열차 내 통로에 설치된 수화물 적재 공간을 이용한 소규모 급송 택배를 운송하고 있다. 하지만 적재공간의 부족으로 수송화물이 2006년 후에는 크게 늘어나지 않고 있다. 특송품 적재 공간은 KTX 열차의 경우 수화물실 16개소 중 6개소(7, 9, 14호차)를 사용하고, KTX-산천 열차의 경우 특송화물실 9개소 중 2개소(8호차 지정)를 사용하고 있다. 열차 1편성당 적재 용적은 KTX는 4.2[m³], KTX-산천은 3[m³]을 이용하고 있다. KTX 특송의 주요 운송화물은 서류/인쇄물 36%, 부

* Corresponding Author : Logistics System Research Division,
Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail: shhan@krri.re.kr

접수일자 : 2016년 11월 13일

최종완료 : 2016년 11월 23일

품류 21[%], 의류 11[%], 식품 9[%], 전자/기계류 8[%] 등 순이다. 이용 건수 및 매출액은 2006년까지 성장 후 현재까지는 성장이 둔화된 상태이다. 이것은 KTX 열차가 승객 수송으로 운행하고 있어 적재 수화물 공간이 부족한 이유가 주원인이 되고 있다[1]. 다음 표 1은 국내 고속화물열차 운행현황을 간단히 비교 설명한 것이다.

본 연구는 기존 운행되고 있는 KTX 여객열차의 영업선로 및 운영 인프라를 토대로 고속화물전용열차를 투입하여 철도화물 수송효율화를 확보하고자 수행되었다[4]. 따라서 신규로 제작될 고속화물전용열차에 대한 차량시스템 기술사양을 수립하기 위해서는 기존 운행 중인 KTX의 견인력을 참고하여 대상 화물의 종류와 크기, 용량을 고려한 가장 효율적인 화물차량의 편성구성방안을 검토하여야 한다. 또한 고속화물열차 차량시스템의 편성구성에 따른 추진성과 제동성능에 기술적 분석연구를 수행하여 최적의 고속화물열차의 추진과 제동 성능을 확보하고자 한다.

표 1 국내 고속화물열차의 운행현황

Table 1 The operation status of high speed freight train in Korea

구분	고속컨테이너 화물열차	KTX 고속열차
열차용도	화물 전용 열차	여객 전용 열차
수송화물	컨테이너	급송화물(서류, 부품, 의류, 식품, 전자류 등)
속도	120km/h	300km/h
편성 당 운송량 수	25량	20량 중 2량 화물간에 4.2[m ³] 용적 적재

2. 고속화물열차 시스템의 주요 사양 분석

2.1 고속화물열차의 차량편성 사양 검토

고속화물열차는 경부고속철도 및 호남고속철도뿐만 아니라 기존철도, 광역철도 등에서도 원활히 운행할 수 있어야 한다. 따라서 고속화물열차의 차량시스템 사양을 정의하기 위하여 국내 고속선로에서 운행하는 KTX, KTXⅡ산천의 기술사양서 자료를 조사하였다[4]. 고속화물열차는 설계속도 330km/h까지 주행이 가능 하도록 추진 및 제동 성능을 갖춰야 한다. 또한 최고운행속도 300km/h에서 주행안전성, 추진성능, 제동성능 등을 만족하여야 한다. 이를 위한 고속화물열차의 기본편성구성은 기존 KTX 동력차량의 견인력을 고려하여 최대 10량 편성과 8량 편성 구성을 함께 고려할 수 있다. 이 편성은 노선 화물수송수요에 따라 축소편성이 가능하도록 설계되어야 한다.

- 10량 편성 : Pc1 - FC1 - FC2 - FC3 - FC4 - FC5 - FC6 - FC7 - FC8 - Pc2

여기서, Pc1, Pc2 : Power Car(동력차), FC1~FC8 : Freight Car(화물차)

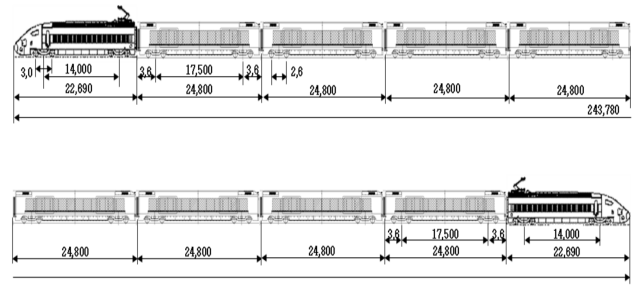


그림 1 고속화물열차의 편성구성도(10량)

Fig. 1 Train set diagram of High speed freight train(10 cars)

열차 편성 중 동력을 갖춘 주행장치는 4개이며 총 8개의 견인전동기로 구성된다. 견인전동기 1대의 출력을 1,100 kW/모터로 고려할 때 정상 운전시 총 견인용량은 8,800 [kW/편성]이 요구된다. 차량의 중량은 만차중량을 고려할 때 동력차량(Pc) 1대는 68톤, 화물차량(FC1~FC8) 1대는 65톤으로 총 656톤으로 검토하였다.

2.2 고속화물열차의 화물적재 구조 설계 검토

고속화물열차의 차체구조는 알루미늄 합금(aluminum alloy)을 사용하여 경량화 하여, 차량 내 화물의 최대 적재 용량을 확보하도록 고려하였다. 차량 크기는 동력차체는 L22,690 x W2,814 x H4,062mm, 화물차체는 L24,800 x W3,100 x H4,320mm으로 설계하였다. 화물차체에는 대형화물전용도어를 W3,200mm x H 2,000mm 크기로 두 개 설치하여 화물의 상하역이 동시에 원활히 이루어지도록 고려하였다. 화물의 크기는 ULD(Unit Load Devices, 이송용기) 1개 당 L2,430 x W1,530 x H1,620mm이며 총 차량 당 7개를 적재하여 차량당 적재화물 중량은 최대 15톤으로 고려하였다. 화물차량의 경우 차체 바닥에 화물적재를 위한 ULD의 이송설비, 화물이송장치, 체결장치, 방향전환 디버터(diverter)를 설비하였다. 따라서 차체의 구조는 수직하중(화물하중, 화물적재설비 및 각종 기기하중) 및 연결기를 통해 전달되는 수평하중을 지지할 수 있도록 설계되어야 한다.

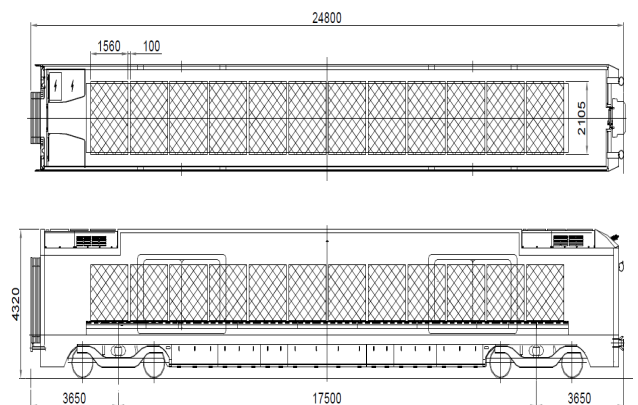


그림 2 차량의 화물적재 일반 구성도

Fig. 2 General diagram of Load space in Vehicle

그림 2와 그림 3에서 보는 바와 같이 화물의 적재는 차량의 차축 대차와 대차사이에 위치하게 하고, 화물적재시스템의 모니터링 및 컨트롤러 등의 부가장치 공간을 확보하였다. 차량의 주행안전성을 확보하기 위하여, 적재화물 및 컨베이어는 단부에서 일정거리만큼 여유를 갖도록 설계하였다.

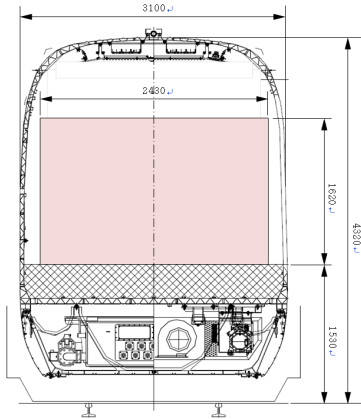


그림 3 차량의 최대 화물적재 일반 구성도
Fig. 3 General diagram of maximum Load space in Vehicle

3. 고속화물열차의 추진 및 제동성능 분석

3.1 고속화물열차의 추진성능 분석 결과

본 연구에서는 고속화물열차의 추진 및 제동시스템 성능 분석을 위하여 열차의 견인력, 제동력, 가속속도, 열차점착성능, 열차주행저항, 열차중량 등을 검토하였다. 고속화물열차의 견인력은 필요한 가속도로 주행하기 위한 힘과 열차의 주행저항을 이기는데 필요한 힘의 합으로 산출된다. 일반적으로 열차의 가속도는 직선평단선로에서 열차가 정지 상태에서 출발하여, 정토크 운전점인 약 60km/h의 속도에 이르기까지의 평균속도를 의미한다. 고속화물열차의 견인력 계산에 적용하는 열차의 가속도는 차량의 견인성능조건에 따라 1.62km/h/s (0.45 $\frac{m}{s^2}$) 이상으로 한다. 또한 5%의 선로구배에서 설계속도 330km/h의 주행이 가능해야 한다.

고속화물열차의 시스템 편성구성에 대한 견인력 성능검토를 위해 10량 편성과 8량 편성을 분석하여 표 2, 그림 4, 그림 5에 각각 나타내었다.

기동시 0~40km/h까지는 가속도는 0.47[$\frac{m}{s^2}$]으로 0.45 [$\frac{m}{s^2}$] 이상으로 주행이 가능 것으로 검토하였다. 한편 최고운행속도 300km/h에서의 가속여력은 0.08[$\frac{m}{s^2}$]으로 산출되었다. 따라서 300km/h의 속도까지 도달거리는 10량 편성은 24km에 451초이고, 8량 편성은 19km이고, 도달시간은 367초로 산출되었다. 두 경우 모두 5%의 구배에서 설계속도 330km/h의 주행이 가능하고, 평행속도는 약 380km/h로 검토되었다.

그림 4에서 10량 편성에 경우는 견인력이 전속도 구간에서 SNCF 점착계수 적용에 문제가 있어 기동 시에는 정토크 구간을 40km/h까지로 낮췄고, 고속구간에서는 SNCF 점착력 한계는 초과하지만, KTX 점착력 한계 내에 있어 문제가 되지 않을 것으로 보인다.

표 2 고속화물열차 편성별 성능분석 비교

Table 2 Comparison of performance analysis each train configuration for High-speed freight train

구분	10량 편성성능	8량 편성 성능
기동 점착력	273.9kN	273.9kN
기동 견인력	316kN(40km/h까지)	254kN(60km/h까지)
기동 가속도	0.48[$\frac{m}{s^2}$](0~40km/h)	0.47[$\frac{m}{s^2}$](0~60km/h)
최고운행속도	300km/h	300km/h
점착력	124.5kN	124.5kN
견인력	102.9kN	102.9kN
주행저항	51.7kN	51.7kN
가속도 여력	0.06[$\frac{m}{s^2}$]	0.10[$\frac{m}{s^2}$]
도달거리	24.5km	19.7km
도달시간	451초	367초
설계속도	330km/h	330km/h
가속여력	0.05[$\frac{m}{s^2}$]	0.07[$\frac{m}{s^2}$]
평행속도	380km/h	380km/h

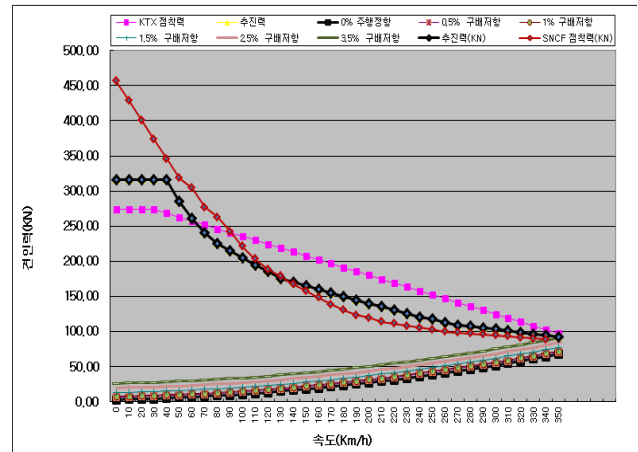


그림 4 고속화물열차 10량 편성 정상운전 견인력 선도
Fig. 4 Traction diagram of 10 cars train set in normal mode

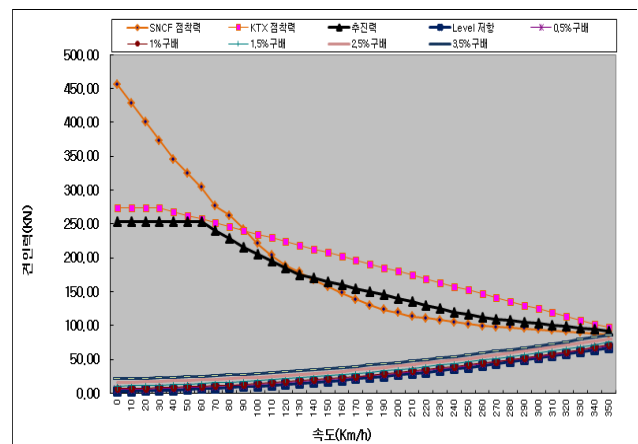


그림 5 고속화물열차 8량 편성 정상운전 견인력 선도
Fig. 5 Traction diagram of 8 cars train set in normal mode

한편 그림 5에서 8량 편성의 경우에는 고속구간에서 SNCF 점착력은 초과하지만 전속도 구간에서 KTX 점착력 한계 내에 있어 운용이 가능한 것으로 검토되었다. 따라서 고속화물열차의 10량 편성으로 운용할 경우에는 기동 시 점착력 문제가 있으므로 중량 감소 등 점착력에 대한 검토가 필요한 것으로 나타났다.

화물열차의 견인력이 비상운전 모드일 경우 전체 구동력의 75%인 6개의 모터로 운행하는 것을 가정하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 분석결과 40km/h까지 가속도 0.35%를 만족하였고, 300km/h 최고운행속도에서 추진력 77kN이 열차주행저항 51kN을 넘어서는 것을 확인하였다.

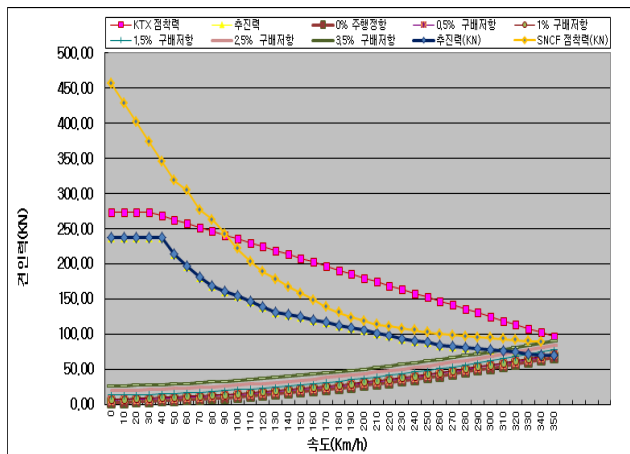


그림 6 고속화물열차 10량 편성 비상운전 견인력 선도
Fig. 6 Traction diagram of 10cars train set in emergency mode

3.2 고속화물열차의 제동성능 분석 결과

고속화물열차의 제동성능 분석은 장치구성, 운행조건, 제동조건, 전기 및 기계 제동장치의 성능 등으로 검토하였다.

제동시스템은 전기지령식 제어로서 자동적으로 전기제동과 공기제동이 자동으로 전환 동작하는 시스템으로 가정하였다. 제동 방법은 동력대차의 전기제동, 화물차대차의 디스크제동, 동력대차의 휠 담면 제동(wheel tread brake)의 순서로 제동이 체결되는 것을 고려하였다. 비상제동거리 기준은 최고운행속도에서 각 선로가 요구하는 철도안전범령에 따라 고속선로에서 300km/h에서 제동시 3,300m 이내, 기존 선로에서 150km/h에서 1,000m 이내로 정지하도록 분석하였다. 희생제동이 고장 또는 실패의 경우도 운전자의 추가 조작 없이 자동적으로 공기제동으로 전환하여 소요제동력을 만족시킬 수 있다는 조건을 고려하였다. 고속화물열차의 제

표 3 고속화물열차의 제동성능 계산 결과(정상운전)
Table 3 Results of braking performance of high speed freight train(normal mode)

구분	량수	희생 제동	차축 디스크	차륜 디스크	담면 제동	주행 저항	제동 거리 (m)	제동 시간 (초)	평균감속도 (%)
상용시	10량	사용	사용	사용	사용	적용	4,064	82	1.07
비상시	10량	사용	사용	사용	사용	적용	3,145	63	1.38

동성능은 비상제동 시에는 희생제동, 차축/차륜 디스크 제동 및 담면 제동력을 사용한다.

표 3과 그림 7은 300km/h에서의 제동력 계산결과로서 제동거리는 3,145m, 제동시간은 63초 및 평균 감속도는 1.38 [%](4.6km/h/s)로 검토되었다. 운행속도 160km/h로 주행시 제동거리는 802m로서 검토되어, 기존선에서 열차운행조건을 만족하도록 하였다. 상용제동 시는 최고운행속도에서 제동을 작용하면 제동거리는 4,064m, 제동시간은 82초, 평균감속도는 1.07[m/s]로 검토되어, 제동시스템 요구사항인 제동감속도 1.08[%](3.8 Km/h/s) 이상을 만족하고 있다.

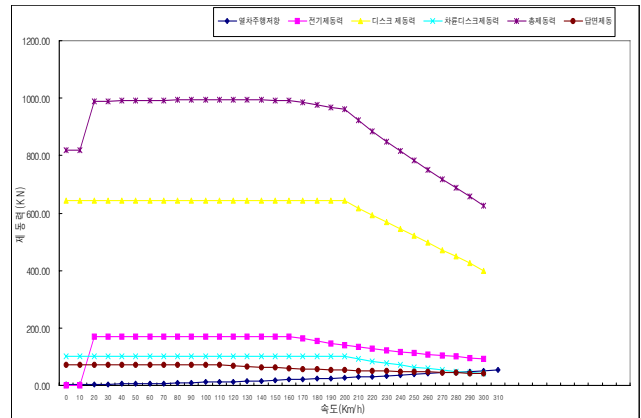


그림 7 고속화물열차 제동력 선도(8모터 정상운전)
Fig. 7 Braking effort diagram of high speed freight train(8 motors, normal mode)

또한, 고속화물열차의 동력차 대차에 차륜디스크를 설치하지 않는 경우에 대하여 표 4와 그림 8에서 보는 바와 같이 분석하였다. 비상 제동시 제동거리는 최고운행속도 300km/h 일 때 3,448m로 검토되어 제동기준인 3,300m를 초과하는 것으로 나타났다. 만일 이 경우에 담면 제동까지 사용하지 않을 경우 비상 제동시 제동거리는 운행속도 300km/h 일 때 3,704m로 제동시스템 요구사항 3,300m를 훨씬 초과하여, 차륜디스크제동과 담면제동을 사용해야 비상 제동시 제동거리를 만족시킬 수 있는 것으로 확인되었다.

표 4 고속화물열차의 제동성능 계산 결과(차륜디스크 미사용, 정상운전)

Table 4 Results of braking performance of high speed freight train(without wheel disc, normal mode)

구분	량수	희생 제동	차축 디스크	차륜 디스크	담면 제동	주행 저항	제동 거리 (m)	제동 시간 (초)	평균감속도 (%)
상용시	10량	사용	사용	미사용	사용	적용	4,584	93	0.94
비상시	10량	사용	사용	미사용	사용	적용	3,448	70	1.25

표 5와 그림 9에는 고속화물열차의 구동 모터 8개중 6개만 구동시 즉 75%의 구동력으로 감소 운행되는 경우에 대하여 검토하였다. 제동성능에 나타나 있는 바와 같이 비상제동시 평균 감속도는 1.33[%], 제동거리는 3,270m 및 제동시

간은 65초로 검토되었다. 따라서 300km/h 최고운행속도에서도 고속화물열차의 제동성능은 충분한 제동력을 확보하고 있음을 확인 할 수 있었다.

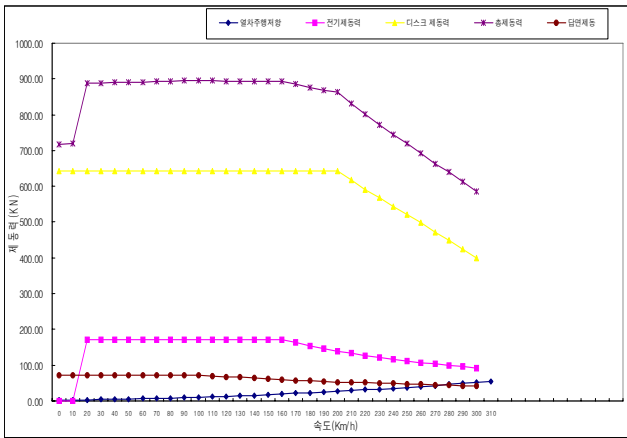


그림 8 고속화물열차 제동력 선도(차륜 디스크 미사용)
Fig. 8 Braking effort diagram of high speed freight train(without wheel disc, 8motors, normal mode)

표 5 고속화물열차 제동성능계산결과(6모터 비상운전)
Table 5 Results of braking performance of high speed freight train(6 motors, emergency mode)

구분	량수	회생	차축 디스크	차륜 디스크	담면 제동	주행 저항	제동 거리 (m)	제동 시간 (초)	평균감 속도 (m/s)
상용시	10량	모터 6개	사용	사용	사용	적용	4,274	86	1.02
비상시	10량	모터 6개	사용	사용	사용	적용	3,270	65	1.33

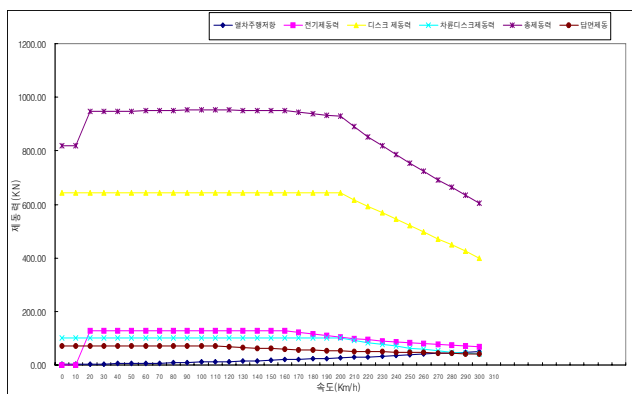


그림 9 고속화물열차의 제동력 선도(6모터 비상운전)
Fig. 9 Braking effort diagram of high speed freight train(6 motors, emergency mode)

4. 결 론

본 연구는 국내 고속선 및 기존선로에서 영업운행이 가능한 최고운행속도 300km/h급 고속화물열차에 대한 성능분석

연구를 수행하였다. 특히 고속화물열차의 효율적인 화물 수송에 적합한 열차 편성을 기준으로 견인력과 제동력을 분석하였다. 검토결과 열차의 기본편성으로 10량을 제시하였고, 이에 대한 추진성능과 제동성능이 각각 75%의 견인력 감소 운전에서도 300km/h 주행이 가능한 견인력, 제동력이 확보됨을 입증하였다. 그러나 추진성능분석에 있어서는 10량 편성으로 운용할 경우에는 기동 시 점착력에 문제가 있는 것으로 검토되었다. 따라서 중량 감소 등 점착력에 대한 검토가 필요하며 이를 차량 제작시 고려되어야 할 것으로 판단된다. 고속화물열차의 제동성능분석에 있어서는 휠 디스크 사용과 미사용에 대한 검토를 비교한 결과 제동력을 확보하기 위해서는 사용이 필수적인 것으로 확인 되었다. 이러한 연구결과를 토대로 고속화물전용열차에 대한 최적의 차량시스템 차량제작사양 수립에 적용할 수 있을 것이다. 향후 철도화물의 효율화를 위하여 고속화물전용열차의 개발 및 성능개선에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 한국철도기술연구원에서 수행한 “철도화물 효율성 향상기술개발” 과제의 연구결과를 기반으로 작성된 것입니다.

References

- [1] J. H. Park, “Planning and research reports of transportation system techniques for developing High-speed freight train(CTX)”, Korea Railroad Research Institute, Dec, 2012.
- [2] Gerhard Troch, “High-Speed rail freight Sub- report in Efficient train systems for freight transport”, KTH Railway Group Report 0512, 2005.
- [3] Euro Carex, “Project of High-speed European rail freight service connected to airport and logistic areas”, 2011.
- [4] S. H. Han, “Second year Report, System integration and evaluation system”, Korea Railroad Research Institute, June, 2015.

저 자 소 개



한 성 호 (Seong-Ho Han)

1996년 2월 숭실대학교 공과대학원 전기공학과(시스템 및 제어전공)졸업 (박사)
1996년 7월~현재 한국철도기술연구원 녹색교통물류시스템공학연구소 물류시스템연구실 수석연구원
E-mail : shhan@krii.re.kr