

화물열차의 공기제동 압력 특성에 관한 실험적 연구

남성원* 문경호* 이동형*

Experimental Study on the Pressure Characteristics of Pneumatic Brake for Freight Train

Seong-Won Nam, Kyung-Ho Moon and Dong-Hyung Lee

Key Words: Pneumatics(공기압), Three-Way Valve(삼동밸브), Brake system(제동시스템), Freight Train(화물열차), Empty-Load Brake(적공제동), Control Valve(제어밸브)

Abstract

Experimental study is conducted to clarify the pneumatic characteristics of brake system for freight train. Empty-load and diaphragm brake systems are mainly installed in the freight trains owned by KNR(Korean National Railroad). Experimental train set is composed of sixteen freight train and one diesel locomotive that are now in use. From the experimental results, in case of commercial brake, empty-load brake system responds to the brake command more slowly than the diaphragm brake system. But, in case of release command, the response time of diaphragm brake system is shorter than that of empty-load one. In the emergency brake test, the decreasing rate of brake pipe pressure of tenth car is almost same that of decreasing rate of commercial brake service.

1. 서론

최근의 도로교통은 자동차의 증가로 인한 교통 정체와 배기 가스로 인한 환경오염 등의 여러 가지 문제를 야기시켰다. 이에 비하여 그동안 투자가 비교적 미미하였던 철도는 대량수송, 저공해, 안전성 및 정시성 등의 많은 장점으로 인하여 교통문제를 해결할 대안으로 재인식되고 있다.

도로 교통과는 달리 목적지까지 각 열차가 동일한 선로를 공유하는 철도의 경우는 후발 열차가 선발 열차를 추월할 수 있는 조건이 제한적이므로 차량 속도가 느린 선발 열차는 후속 열차의 진행 속도에 제한을 주게되며, 시간적 제약은 전체 선로의 이용률을 저하시키는 결과를 가져오므

로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 화물열차의 속도 향상에 대한 노력이 경주되어 왔다. 이와 병행하여 제동 장치의 고성능화를 통한 안전성 확보는 차량 고속화와 불가분의 과제로서 인식되어 왔다. 특히 화물 열차와 같이 다양한 차종이 혼재되어 수십량씩 길게 편성되는 경우에는 전부와 후부 차량간에 공기제동 압력 변화가 동시에 일어나지 않으며, 이는 전후부 차량간에 제동력의 차이로 인하여 제동시의 차량간 충격이나 제륜자의 마모 및 차륜찰상 등과 같은 문제를 야기시킨다. 이러한 문제점에 대한 해결 방안을 도출하기 위하여는 화물열차의 제동 및 완해 작용시의 각 차량의 압력변화 특성을 정량적 및 정성적으로 파악할 필요가 있다.⁽¹⁻⁵⁾ 본 연구에서는 현재 운용중인 화물열차 중 적공 제동장치 및 다이하램식 제동장치를 장착한 차량과 기관차를 이용하여 실차 실험을 하였다.

* 회원, 한국철도기술연구원 차량연구부

2. 화물열차의 공기제동 시스템

Fig.1에 화물열차의 공기제동 시스템의 개략도를 나타내었다. 화물열차가 편성되면 기관차에 장착된 공기압축기의 작동으로 주공기통(main reservoir : M.R)에 압축공기를 저장하고 이를 차량간에 연결된 제동관(brake pipe : B.P)을 통하여 각 차량에 부착된 보조공기통(auxiliary reservoir : A.R)에도 일정압력(5kg/cm²)의 압축공기를 충전하게 된다. 열차를 정지 또는 감속시킬 필요가 있을 때에는 기관차에 있는 제동밸브(brake valve : B.V)를 조종하여 제동관의 압축공기를 대기로 방출시켜 압력을 감압시키게 된다. 이러한 제동관의 압력 강하를 신호로 받아서 화물열차의 각 차량에 장착된 제어밸브(control valve : C.V)는 보조공기통(auxiliary reservoir : A.R)내의 압축공기를 제동실린더(brake cylinder : B.C)로 보내어 제동피스톤을 작동시킴으로서 제륜자와 차륜간에 마찰력을 발생시킨다.

완해(release)시에는, 제동밸브의 작동으로 주공기통의 압축공기를 보조공기통 및 제동관에 보내어 제동관의 압력을 상승시킨다. 이를 신호로 받은 제어밸브는 제동실린더내의 압력공기를 대기로 방출하여 제동피스톤을 원래의 위치로 복귀시킴으로서 차륜에 밀착되어 있던 제륜자를 완해시킨다.

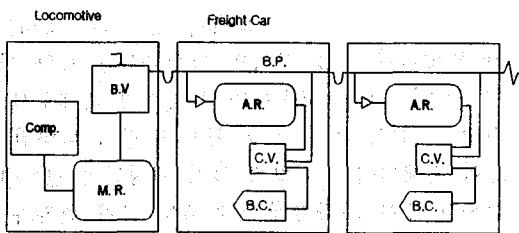


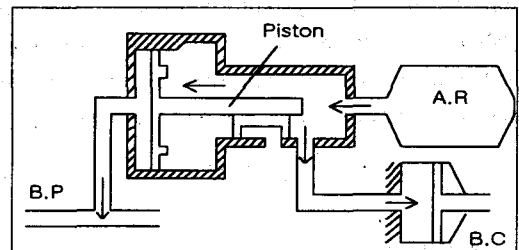
Fig. 1 Schematic Sketch of Brake System for Freight Train

Fig.2에 철도 차량의 제동장치에 사용되는 제어밸브의 제동 및 완해 기능을 나타내었다. 제어밸브의 주요 작용으로 (a)제동작용의 경우, 제동관의 압력공기를 대기로 방출시키면 제어밸브 내의 피스톤은 보조 공기통측의 압력과 제동관측의

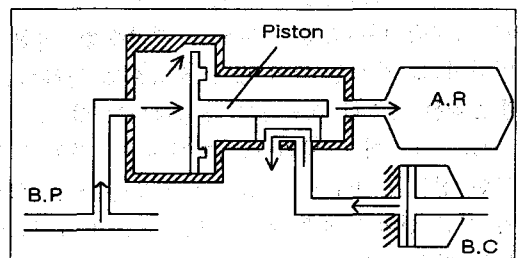
압력차이로 인하여 좌측으로 이동하게 그림(a)와 같은 위치에 있게 된다. 따라서 보조공기통과 제동실린더가 연결되어 보조공기통의 압력공기가 제동실린더로 유입되어 제동실린더 내의 피스톤을 작동시킨다. 제동실린더의 피스톤은 제동레버 기구를 통하여 연결된 제륜자를 차륜에 밀착하여 마찰력을 발생시킨다.

한편, 그림(b)와 같이 완해작용의 경우, 공기압축기의 압축공기가 제동관으로 보내어지면 제어밸브의 피스톤은 좌우 압력 차이로 인하여 이동하게 되며 충전 흡을 통하여 보조공기통에 압축공기가 보내어진다. 이와 동시에 제동실린더의 압력공기는 대기중으로 배출되어 제동실린더내의 피스톤은 원래의 위치로 복귀된다.⁽⁶⁾

이와 같이 열차의 공기제동 장치는 압력 공기가 가득 차있는 제동관의 압력을 강하시킴으로써 제동작용이 일어나고, 반대로 제동관의 압력을 상승시켜 완해 작용이 일어나는 구조이다. 따라서, 운행중에 열차가 분리되거나 제동관에서 심한 누설이 발생하였을 때 기관차에서 제동지령을 내리지 않더라도 자동적으로 제동이 체결된다.



(a) Brake Operation



(b) Release Operation

Fig. 2 The Control Valve of Pneumatic Brake System

3. 실험 개요 및 방법

Fig.3에 실험 대상 열차의 편성과 실험 개략도를 나타내었다. 실험 대상 열차는 디젤기관차와 화물열차 16량으로 편성되어 있으며, 각각 1량, 6량, 11량, 16량 차량의 제동관과 제동실린더에 압력센서를 설치하였다. 실험 대상 열차는 다이어프램식 제동장치를 장착한 컨테이너 화물열차 8량과 적공 제동장치를 장착한 벌크 화물열차 8량으로 구성되어 있다.

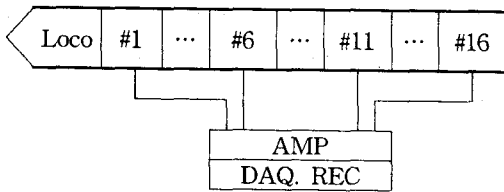


Fig. 3 Freight Train for Experiment

다양한 실험 조건을 주기 위하여 기관차의 위치를 전후부로 변경시켜 동일 위치의 차량이 전후부 조건으로 되게 하였다. 또한, 비상제동, 상용제동, 미소제동 조건에 대한 각 차량의 제동관 및 제동실린더 압력 변화를 동시에 측정하였다. 화물열차는 화물을 적재하였을 때와 적재하지 않았을 경우의 무게 변화가 차체 자체의 무게보다 더 크므로 이에 대한 조건도 응하중 밸브를 조정하는 방법으로 부여하였다.

사용한 압력센서는 정격용량 10kg/cm², 정격출력 1.0mV이며, 표본을 100kS/s의 12비트 데이터 취득 및 분석처리 장치를 사용하였다.

4. 결과 및 검토

Fig.4 에 미소 제동(0.7kg/cm²감압) 작동시의 각 차량의 제동관 및 제동실린더의 압력 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 각 차량의 제동관의 압력 변화 차이는 1량을 제외하고는 6량, 11량 및 16량이 거의 동시에 변화되므로 이를 제동신호로 받은 제동실린더의 압력 변화 또한 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나, 같은 형식의 적

공 제동 장치(E-L)라도 제동 및 완해시 1량과 6량의 제동실린더의 압력 상승 및 강하시, 차량간에 시간 차이가 발생하며 제동지령이 완료된 후에도 다이어프램식 제동장치에 비하여 다소 불균일한 압력을 나타낸다. 이러한 현상은 결국 차량간의 제동력의 불균형을 초래하여 열차가 정착시 덜컹거리게 할 뿐만아니라 제륜자 및 차륜의 마모를 촉진시키게 된다. 화물열차와 같이 수십량씩 길게 편성되어 운행되는 경우는 차량수가 많아질수록 이러한 차량간 압력 불일치는 심하여 지므로 가능한 한 공기제동 시스템에서의 압력 손실 요소를 저감시켜 차량간 압력 불평형을 해소할 필요가 있다.

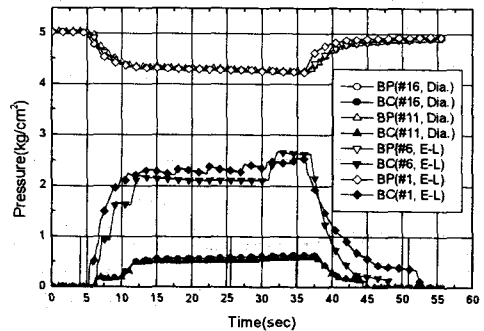
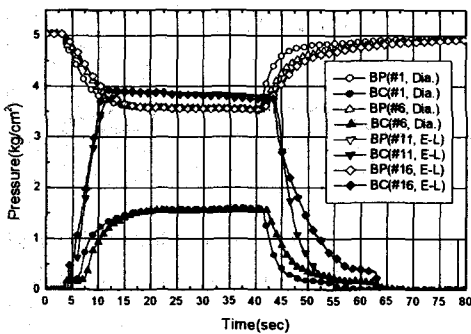


Fig.4 Pressure Variation of Brake Pipe and Cylinder in case of Minimum Brake

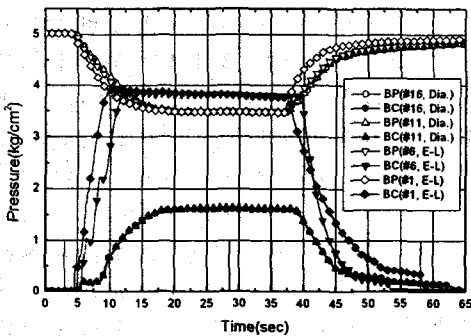
Fig.5에 상용 제동(1.5kg/cm²감압) 작동시의 각 차량의 제동관 및 제동실린더의 압력 변화를 나타내었다. 상용 제동은 열차 운행시 정상적으로 정지할 때의 제동 작용으로서 가장 빈번하게 사용된다. 미소제동 때와는 달리 1량 차량의 제동관의 압력 변화가 더 커졌음을 알 수 있다. 그러나, 미소 제동 때에 나타났던 적공 제동 장치의 제동실린더 압력의 불균일성은 없어졌는데 이것은 적공 제동 장치의 삼동 밸브의 작동이 밸브내의 피스톤의 이동에 의하여 이루어지므로 미소 제동과 같은 작은 압력 변화에는 민감하게 반응을 나타내지 못하는 반면 상용 제동과 같은 압력 변화에는 피스톤의 마찰력이 크게 작용하지 않으므로 제동시의 제동실린더의 압력이 일정하게 나타나는 것으로 사료된다.

또한, 기관차의 위치를 전후부로 변경시켜 동일한 차량이 1량 또는 16량 위치 조건으로 한 실험을 통하여 차량 위치에 따른 압력 변화를 측정하였다. 다이어프램식 제동장치를 장착한 차량을 기관차의 뒤에 연결하여 1량 및 6량 위치에, 적공 제동장치를 장착한 차량이 11량 및 16량 위치에 오게 한 경우를 (a)와 같은 전두부 조건으로 하였으며, 이와 반대 조건을 (b)와 같은 후부 조건으로 가정하였다.

전두부 위치에서는 다이어프램식 제동장치 차량의 제동실린더 압력 상승에 차량간 시간 차이가 있었으나 완해 작동에서는 제동실린더의 압력 강하 시간 차이가 모든 차량에서 발생하였다. 다이어프램식 제동 차량은 순차적으로 압력 강하가 일어난 반면, 적공 제동 차량은 초반에는 16량 차량이, 후반에는 11량 차량이 빠른 응답 특성을 나타내었다.



(a) Front Side



(b) Rear Side

Fig.5 Pressure Variation of Brake Pipe and Cylinder in case of Commercial Brake

후부 위치에서는 다이어프램식 제동장치 차량의 경우, 차량 위치에 관계없이 압력 상승 및 압력 강하가 일어났다. 그러나 적공 제동장치 차량의 경우, 압력 상승 뿐만아니라 압력 강하시에도 차량 위치에 따라 시간 차이가 발생함을 알 수 있다. 따라서, 여러 가지 차종을 혼합하여 운행할 경우, 다이어프램식 제동장치 차량은 편성 차량의 전두부에, 적공 제동 장치 차량은 후부에 편성하는 것이 차량간 압력 변화가 작으므로 제륜차 및 차륜의 마모 또는 차량간 충격력 저감면에서 유리할 것으로 사료된다.

운행중의 열차가 돌발 사태에 직면하거나 열차 사고 등이 발생하였을 때에는 비상제동(5.0kg/cm² 감압)이 작동된다. 비상제동이 작동되면 기관차의 공기 압축기에서 화물열차로 압축공기를 공급하는 통로에 설치된 차단밸브가 닫혀지게 되며, 각 차량의 제어밸브에 있는 비상 작동부가 개방되어 보조 공기통의 압축 공기를 최대한 빨리 제동실린더로 보내어 열차 제동거리를 짧게 하도록 한다. Fig.6에는 이와 같은 비상 제동시의 제동관 및 제동실린더의 압력 변화를 나타내었다.

미소 제동 및 상용 제동 때와는 달리 1량 위치의 제동관의 압력 변화 곡선에 불연속적인 부분이 존재하는데 이것은 큰 압력 변화가 짧은 시간에 일어나므로 제동관에서의 팽창파의 발생에 따른 것으로 사료된다. 또한 1량 차량과는 달리 6량 차량의 제동실린더 압력은 제동 작동후, 서서히 압력이 감소되는 경향을 나타내는데, 이는 6량 차량의 제동관로에서 누설이 발생하는데

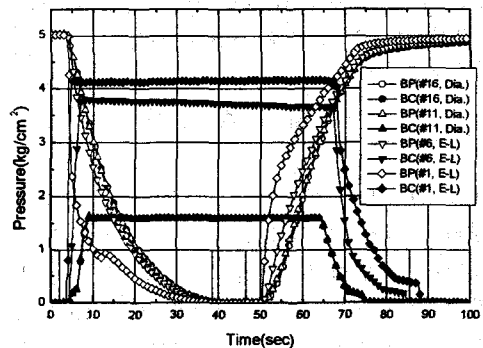


Fig.6 Pressure Variation of Brake Pipe and Cylinder in case of Emergency Brake

따른 것으로 판단된다. 각 차량의 공기 제동관로에는 다수의 관 이음과 밸브 등이 연결되어 있으므로 제동 작동을 일으키지 않는 범위에서의 공기 누설은 빈번하게 발생하고 있는 것이 현실이다. 그러나 일정 한도 이상의 누설이 일어나면 자동적으로 제동이 체결되므로 과다 누설 차량에 대하여는 정기적인 차량 보수를 통하여 제동관로를 교환하여야 한다.

비상제동에서도 1량 차량의 제동관의 압력 변화 곡선이 다른 위치의 차량의 압력 곡선과는 시간적 차이를 보이지만 그 차이는 더 증대되었음을 알 수 있다. 제동 감압량이 커지면 제어밸브를 통하여 대기로 배출되는 공기의 유출속도가 커지므로 차량간 제동관의 압력 변화 차이도 커지게 된다. 즉 관로에서의 국소 손실을 일으키는 손실계수는 일반적으로 속도의 제곱에 비례하므로 제동관의 유출 속도의 증가에 따라 유동손실도 증가한 것에 기인한 것으로 사료된다.

Fig.7에 미소, 상용 및 비상 제동에 대한 제동장치별 및 차량 위치에 대한 응답 지연 시간을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 적공 제동장치(E-L)는 다이어프램식 제동장치(Dia.)에 비하여 차량 위치 변화에 따른 응답 지연 시간의 변화 폭이 큰 것으로 나타났다. 비상 제동의 경우 1량~16량 위치에 따라 Δt 가 3.5초의 폭을 나타낸 반면, 다이어프램식 제동장치의 경우 Δt 가 2초이었으며, 상용 제동에서는 적공 제동장치의 Δt 가 5초, 다이어프램식 제동장치의 Δt 가 2초로 나타났다.

이러한 결과는 화물 열차가 시속 60km/h로 주행 중 상용 제동을 하였을 때의 예를 들면, 적공 제동장치 차량의 1량째 차량이 제동이 작동된 후 16량째 차량은 약 83m를 더 진행한 후에야 제동이 작동되며, 다이어프램식 제동차량의 경우 약 33m를 지난 후에 비로소 16량째 차량이 제동 작동되는 것을 의미한다. 즉 응답 지연 시간만큼 전두부에 편성된 차량은 후부 차량의 제동력까지도 분담하여야 하므로 제동 마찰력을 발생시키는 제륜자 및 차륜에 실제 조건보다 가혹한 환경을 주게되며, 그 결과 이러한 부품들의 과다 마모등의 발생하여 예정된 부품교환 주기를 단축시키게 된다.

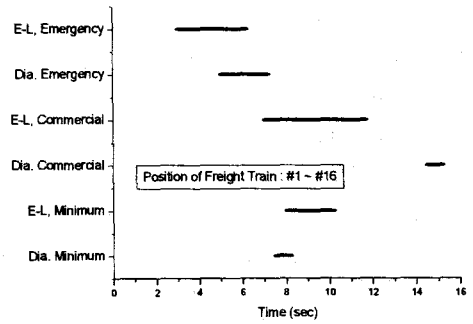


Fig.7 Time Delay for Brake Operation

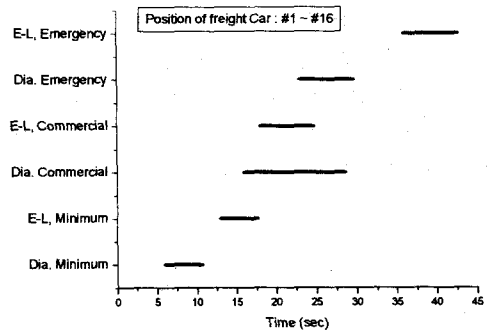


Fig.8 Time Delay for Release Operation

완해 시간 지연은 제동시간 지연과는 달리 열차 운행상의 문제점을 유발시킨다. 화물열차의 공기제동 시스템의 특성상, 제동이 작동되면 제륜자는 차륜에 계속 밀착되어 있으므로 제동관을 통하여 압축공기를 공급하기 전에는 제륜자와 차륜이 해방되지 않는 구조이다. 따라서 완해 작동이 일어나지 않으면 열차를 견인할 수 없게되므로 완해 지연 시간이 길어지면 후속 열차의 운행에도 지장을 초래하게 된다. 따라서 제동 지연 시간 뿐만아니라 완해 지연 시간도 단축하여야 열차 운행 효율을 향상시킬 수 있다.

제동 장치별 완해 지연 시간에 대한 결과를 Fig.8에 나타내었다. 적공 제동장치 차량의 경우, 비상 제동후 차량간 완해 지연시간 Δt 는 6초, 다이어프램식 제동 장치의 경우 Δt 가 6초로 같았으나, 상용 제동의 경우, 적공 제동 차량이 6초, 다이어프램식 차량이 12초로 2배이었다.

열차가 운행 도중 분리되거나 제동관 및 연결 고무 호스 등에서 공기 누설이 심하게 발생되면 기관차에서 제동 작동을 하지 않더라도 자동적으로 즉시 비상 제동이 체결되어야 열차 운행상 안전성이 확보된다. 이러한 비상 제동 체결 시험을 모사하기 위하여 본 연구에서는 편성된 열차의 고무호스 연결부를 급격히 개방하여 비상 제동 체결 속도를 측정하였다. 기관차 후부에 연결하는 화물열차 수를 증가시켜가면서 차량수에 대한 감압속도를 측정하였다. 그 결과 차량수가 증가하면 제동관의 감압 속도는 감소함을 알 수 있었다. 실험값들을 기초로 구한 커브피팅식을 이용하면, 화물열차의 차량수가 10량 이상이 되면 상용 제동의 이론적 감압 속도값 $0.15\text{kg/cm}^2/\text{s}$ 보다 작게됨을 알 수 있다. 따라서 10량 이상 길게 편성되는 화물열차에 대하여는 열차 분리 사고 등을 대비한 비상 제동 체결에 대한 대책 방안 수립이 필요할 것으로 사료된다.

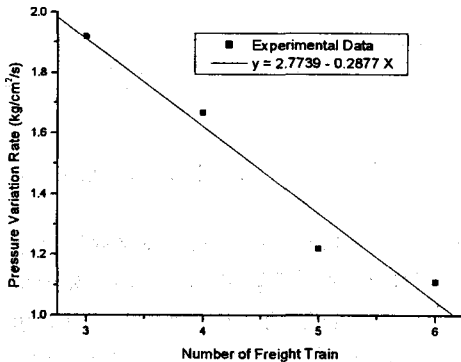


Fig.9 Pressure Variation Rate for Emergency Brake Operation

4. 결론

본 연구에서는 다양한 차종으로 구성된 화물열차의 공기 제동장치의 압력 특성에 관한 실험적 연구를 하였다. 현재 우리나라에서 운용중인 화물열차에 많이 사용되는 적공 제동장치와 다이아프램식 제동장치 화물열차 16량과 기관차를 이용하여 실차 실험을 하였으며, 다양한 조건을 부여하기 위하여 미소제동, 상용제동 및 비상제동에 대한 실험과 열차 위치에 따른 응답 지연 시간

등을 측정하였다. 또한 열차 분리 사고 등을 가정한 비상 제동 체결 모의 시험을 실시하였다. 각 화물열차 제동관과 제동실린더의 압력변화 특성 및 압력 추종성을 정량적 및 정성적으로 파악하였으며, 얻어진 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 적공 제동장치 차량은 미소 제동 작동시, 다이아프램 제동장치에 비하여 불균일한 압력 특성을 나타내었다.
- (2) 상용 제동시, 차량 위치에 따른 제동 응답 지연 시간은 적공 제동장치의 경우 5초, 다이아프램식 제동장치의 경우 2초이며, 비상 제동시에는 각각 3.5초와 2초이다.
- (3) 차량 위치에 따른 비상 제동후 완해 지연 시간은 적공 제동장치와 다이아프램식 제동장치 모두 6초이며, 상용 제동후 완해 지연 시간은 각각 6초와 12초로 나타났다.
- (4) 열차 분리를 가정한 비상 체결에 따른 감압 속도는 상용제동 감압속도 보다 작아지는 차량수는 10량이였다.

참고문헌

- (1) S.Bharath, B.C.Nakra and K.N.Gupta, 1990, "A distributed mathematical model for pressure transient analysis in railway pneumatic brake system" *Int.J.Mech.Sci.*, Vol.32, No.2, pp.133~145
- (2) M.A.Murtaza and S.B.L. Garg, 1989, "Brake modelling in train simulation studies" *IMEchE Part F*, Vol.203, pp.87~95
- (3) K.Abdol-hamid and D.ELimbert, 1988, "The effect of leakage on railroad brake pipe steady state behavior" *ASME J. Dynamic system Measurement and Control*, Vol.110, pp.329-335
- (4) 남성원, 문경호, 이동형, 최경진, 권석진 "막판식 공기제동장치의 압력 특성에 관한 실험적 연구" 대한기계학회 1999년도 추계학술대회논문집 B, pp.706~711
- (5) 熊谷則道, 長谷川泉, 永瀬和彦., 1990. "鐵道車輛空氣ブレーキ機器の減壓特性" *日本機械學會論文集(B)*, 56券529號, pp.2672~2677
- (6) 客貨車概論, 1993, 交友社, pp.128~245