

TCMS 에 의한 전동차 추진/제동 제어기법

A Study of Train Powering/Braking Control by TCMS

한 정수*, 박 성호**, 김 국진***, 박 계서****,
HAN, JEONG-SOO PARK, SUNG-HO KIM, KUK-JIN, PARK, GYE-SEO

ABSTRACT

TCMS(Train Control & Management System) is the management system of train information which intensively control, monitor and test the main on-board equipments including propulsion/brake unit by the serial transmission line. TCMS reduces interface circuits and number of train lines by the software logic and utilizing serial communication method.

This paper describes the method of powering and braking control by TCMS software logic, in comparison with the powering / braking control by conventional relay logic / hardwire circuits, and the software logic was verified by simulation test with TCMS simulator.

1. 서 론

최근 국내의 대/중소 도시에서 통근형으로 적용 및 운행되고 있는 전동차는 VVVF(가변전압, 가변 주파수)제어를 채용한 추진장치, 제동 장치가 자동제어장치(ATC)/자동운전장치(ATO) 등과 연계하여 모든 제어가 컴퓨터화 되고 있다. 모든 전동차 시스템이 컴퓨터화함에 따라 이들 장치의 상태를 통합적으로 제어 및 감시하는 시스템, 즉 종합제어 관리장치(TCMS:Train Control & Management System)가 필수적으로 필요하다. 본 연구에서는 열차 종합제어관리장치의 핵심기능인 추진 및 제동제어기법에 대한 연구결과로서 TCMS에 의한 SOFTWARE LOGIC 및 직렬통신(SERIAL COMMUNICATION)방식으로 구현하기 위한 제어기법을 제안하였다. 또한 제안한 제어기법을 SOFTWARE로 구현, SIMULATOR를 통한 모의 시험을 통하여 제어기법의 타당성 및 안전성을 검증하였다.

* 현대정공(주) 기술연구소 선임연구원, 정회원

** 현대정공(주) 기술연구소 주임연구원, 비회원

*** 현대정공(주) 기술연구소 책임연구원, 정회원

**** 현대정공(주) 기술연구소 수석연구원, 정회원

2. TCMS에 의한 추진/제동 제어기법

본 연구에서는 TCMS에 의한 추진/제동 제어를 서울시 6호선 전동차(8량 1편성, 편성구조: TC1-M1-M2-T1-T2-M1-M2-TC2)를 대상으로 구현 및 모의시험을 수행하였으며, 6호선 전동차 사양에 따른 추진력/제동력 DATA를 표 1에 정리하였다. [3][4] TCMS와 제동장치, 추진장치(VVVF INVERTER)는 그림 1과 같이 직렬통신으로 연결하며 ATO장치에 의한 자동운전이 가능한 구조로서, 1 핸들 TYPE의 MASTER CONTROLLER와 추진/제동 장치 및 제동 장치와 추진 장치사이에는 별도의 HARDWIRE를 연결할 필요가 없다. 즉, 추진제어시 TCMS에서 운전대의 방향 및 추진NOTCH을 입력받아 속도에 따른 추진력을 계산, 열차상태에 따라 직렬통신으로 추진장치로 전송한다. 제동제어시 TCMS는 운전대의 제동 NOTCH을 입력받아 열차의 상태에 따른 총 요구 제동력을 계산, 속도에 따른 추진장치의 최대 회생제동력을 전송하고 그 부족분 및 추진장치로부터의 실제 회생제동력으로 인한 부족분을 M차 및 T차의 공기 제동력으로 체결하기 위해 각차의 단말장치(CAR COMPUTER)로 전송, 단말장치는 제동장치로 전달하여 항상 일정한 제동력을 얻도록 제어한다. 이때, 안전성을 위해 보안제동(SB) 및 비상제동(EB PB 또는 ATC EB)은 기존 방식과 같이 별도의 HARDWIRE로 구성한다.

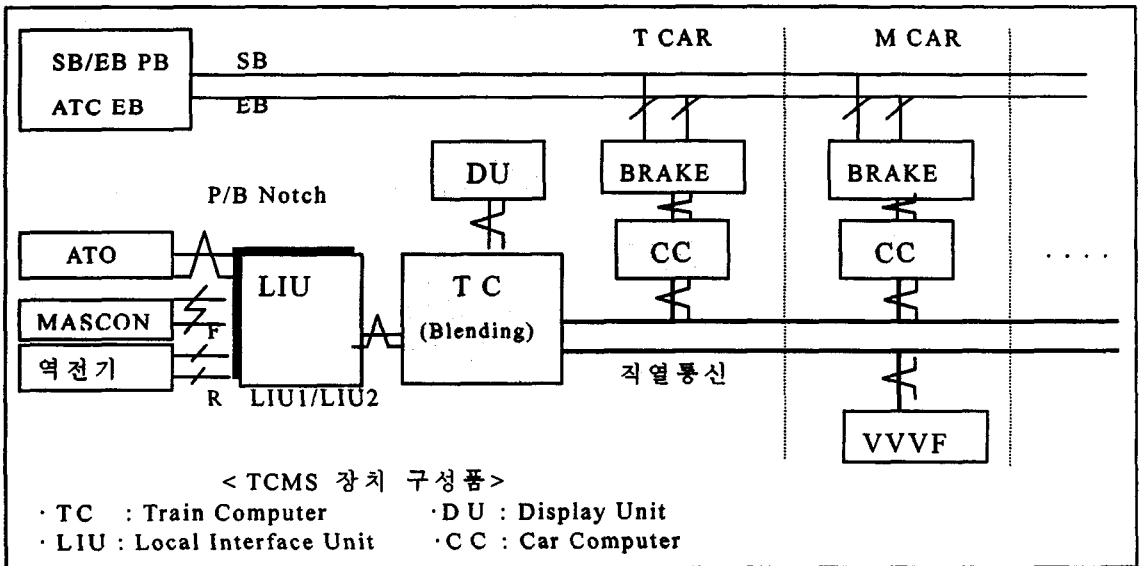


그림 1. TCMS에 의한 추진/제동제어방식 구성도

2.1 추진제어 기법

본 연구에서 제안된 추진제어 기법은 그림 2와 같다.

열차운전모드에 따른 추진력 기준값(%)을 선택한후, 먼저 열차감시 LOGIC을 수행하도록 하였다. 열차감시 LOGIC은 기존 전동차에서는 HARDWARE/RELAY LOGIC으로

표 1. 서울시 6호선 추진/제동력 DATA TABLE

차종	TC	T1	T2	M1	M2	TOTAL	TCM1	M2T1	T2M1	M2TC	비고	
공차 중량	33,552	29,413	29,378	35,705	35,751	268,807	69,257	65,164	65,083	69,303	단위:KG	
대차 중량	10,900	10,600	10,600	13,913	13,913	98,652						
최대승객하중	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	160,000	40,000	40,000	40,000	40,000		
만차 중량	53,552	49,413	49,378	55,705	55,751	428,807	109,257	105,164	105,083	109,303		
공차제동중량	35,565	31,178	31,141	40,704	40,756	296,368	76,269	71,934	71,844	76,321		
만차제동중량	55,565	51,178	51,141	60,704	60,756	456,368	116,269	111,934	111,844	116,321		
FBE(공차)	34,577	30,312	30,276	39,573	39,624	288,136	74,150	69,936	69,849	74,201	B7	
FBE(만차)	54,022	49,756	49,720	59,017	59,068	443,691	113,039	108,825	108,738	113,090	B7	
희생 제동력	= M차 중량 * 점착계수 (0.16)*9.8(N)					222,912					N	
공차				55,985	56,058							
만차				87,345	87,418	349,526						

구현된 것으로, 본 SOFTWARE LOGIC에서는 전동차 시스템의 모든 추진 차단조건을 검색하여 차단조건이 없는 경우만 추진력 기준값(P0.5, P1 ~ P4)을, 차단조건시 0 값을 다음 단계의 속도에 따른 추진력 계산 LOGIC(VELOCITY ADAPTATION)으로 전달하도록 한다. 이때, 수동운전시 MASCON NOTCH 별 추진력 기준값(TE s :%)은 다음과 같이 설정한다.

P0.5 : 15%, P1.0 : 30%, P2.0 : 50%, P3.0 : 75%, P4.0 : 100% (가속도:3.0Km/h/s)

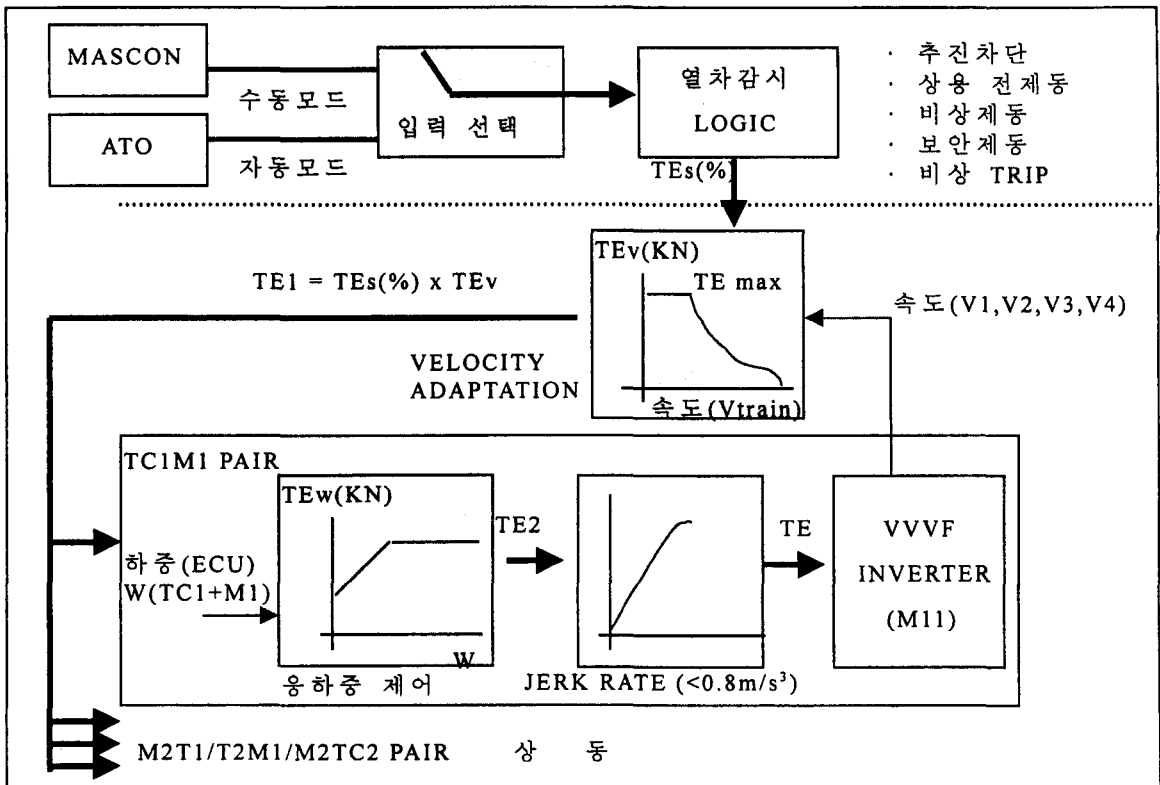


그림 2. TCMS에 의한 추진제어 BLOCK DIAGRAM

속도에 따른 추진력 PATTERN(TEv)은 견인전동기 특성에 따라 결정되며, 본 연구에서는 40Km/h 까지는 일정 가속도를 유지하는 6 호선 특성곡선^[3]을 사용하였다. 6 호선 전동차의 최대 요구 추진력(TE max) 및 추진력 출력(TE1)은 다음과 같이 구한다.

$$TE \max = (\text{만차제동중량} \times \text{최대요구 가속도}) + (\text{속도 } 40\text{Km/h의 주행저항})^{[3]}$$

$$= 456.4 \times 0.83 + 19.024 = 397.80 \text{ KN} \quad \text{---- (식 1)}$$

$$TE1 = TE v \times TE s(\%) \quad \text{---- (식 2)}$$

이때, 열차의 속도는 4 대의 VVVF 인버터(M11, M21, M12, M22)의 4 축 속도로부터 추진중 SLIP/제동중 SLIDE 를 고려한 평균치를 사용한다.

다음 단계로 전동차의 승객무게에 상관없이 일정 가속도를 얻기 위하여 MT 쌍에 대한 옹하중 제어를 수행한다. 제동중량 %는 (공차 제동중량/만차 제동중량)의 비로서, 제동장치로부터 얻은 승객하중에 따라 이에 비례한 추진력 값(TE2)을 얻는다.

$$TE2 = TE w \times TE1 \quad \text{---(식 3)}$$

최종적으로 급가속에 의한 승차감이 떨어지는 것을 방지하기 위하여 저크 제어된 추진력(TE)을 직열통신을 통하여 전동차의 추진방향(전진/후진)과 함께 VVVF 인버터로 전송한다.

2.2 제동제어 기법

본 연구에서 수행한 TCMS 에 의한 제동제어 절차는 그림 3 과 같다. 추진제어와 같이 열차감시 LOGIC 를 통하여 제동력 기준값을 구한다. 이때 비상제동 및 보안 제동시는 VVVF 인버터에 의한 회생 제동력값을 0 로 한다. 수동운전시 MASCON 의 제동 NOTCH 별 제동력 기준값(BE s:%)은 다음과 같이 설정한다.

$$B1 : -13.5\%, \quad B2 : -27.5\%, \quad B3 : -42.0\%, \quad B4 : -56.5\%$$

$$B5 : -71.0\%, \quad B6 : -85.5\%, \quad B7 : -100\%(\text{요구감속도:}3.5\text{Km/h/s})$$

제동력 최대 기준값(BE s:100%)에 따른 MT 쌍에 대한 최대 요구제동력 및 MASCON NOTCH 에 대한 요구 제동력(BEdem)은 다음과 같다.(표 1 참조)

$$BE \max = \text{만차 제동중량} \times \text{최대 요구 감속도}$$

$$= 456.368 \times 0.97 = 442.67 \text{ KN} \quad \text{---(식 4-1)}$$

$$BE_{(MT \text{ PAIR})} = BE \max / 4 = 110.9 \text{ KN} \quad \text{---(식 4-2)}$$

$$BE \text{ dem} = BE_{(MT \text{ PAIR})} \times BE s(\%) \quad \text{---(식 4-3)}$$

그러므로 제동장치로부터 받은 승객하중에 따른 옹하중 제어에 의하여 요구 제동력(BE1)이 최종 계산된다.

$$BE1 = BE \text{ dem} \times BE w \quad \text{----(식 5)}$$

속도에 따른 전기 제동력 PATTERN(DBEv)은 견인전동기 특성에 따라 결정되며, 본 연구에서는 60Km/h 에서 최대 회생력을 내고 속도가 15km/h 이하로 떨어질때 회생력이 급격히 감소하는 6 호선 특성곡선을 사용하였으며^[3] DBEv 에서 6 호선 전동차의 최대 요구 전기 제동력(DBE max)은 국내에서 일반적으로 적용하는 16%의 점착계수

를 사용하여 식(6-1), 식 (6-2)과 같이 계산한다.

$$DBE_{max} = M \text{ 차 중량} \times \text{점착계수} \times 9.8N$$

$$= 223 \times 0.16 \times 9.8 = 350KN \quad \text{----(식 6-1)}$$

$$DBE_{max}(1 \text{ INV.}) = DBE_{max} / 4 = 87 KN \quad \text{---- (식 6-2)}$$

식 (5)와 식 (6-2)에 의하여 다음과 같이 인버터로 요구하는 전기제동력(DBE1)을 산출한후 저크제어된 값을 직열통신을 통하여 VVVF 인버터로 전송한다.

$$DBE1 = \text{MIN}(BE1, DBEv \times BE \text{ dem}) \quad \text{----(식 7)}$$

이때, 일정한 요구 감속도를 얻기위해 필요한 공기제동력(FBEt)은 다음과 같이 계산, 전기/공기 제동 BLENDING 제어를 수행한다.

$$FBEt = (BE1 - DBE1) + (DBE1 - EFM) \quad \text{---(식 8)}$$

여기서, EFM: 인버터로 부터의 실제 전기 제동력
 그러므로 공기제동 우선순위에 따라 식 (8)값을 각 차량별 최대 공기 제동력(만차조건)에 따라 FBE(T), 부족시 FBE(M)으로 나누어 CC를 통하여 제동장치로 전달하여 제동력을 제어한다. 각 차량별 최대 공기 제동력은 표 1 과 같다.

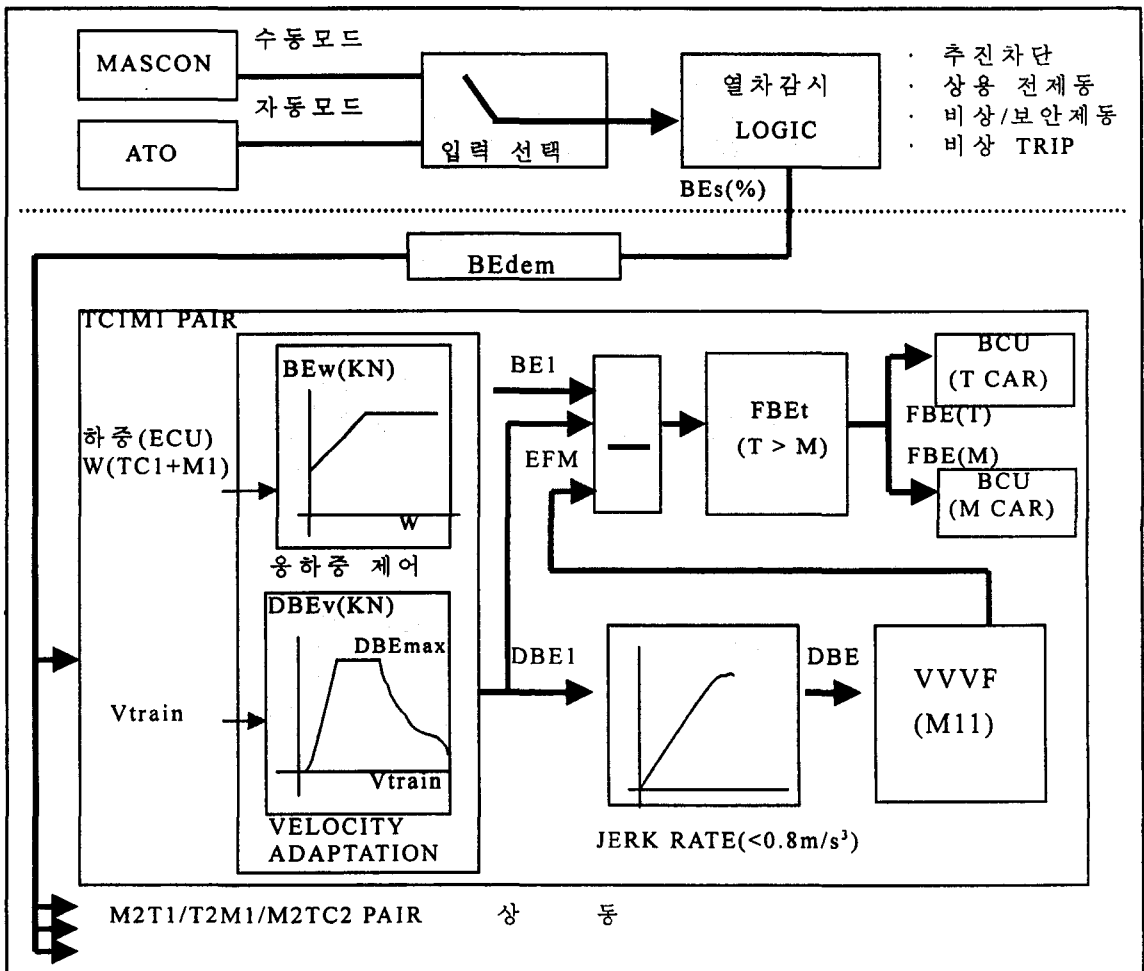


그림 3. TCMS 에 의한 제동제어 BLOCK DIAGRAM

3. 모의 시험 및 고찰

3.1 모의시험 환경

현차시험전 전동차의 운행환경(8량 1편성분)을 가상으로 구현하기 위한 시뮬레이터를 제작하여(그림 4), 6호선 전동차와 동일하게 TCMS의 제어 대상이 되는 추진 제어 장치(VVVF 인버터), 제동장치, 출입문, 냉난방, SIV, 고전압장치, ATC/ATO 등의 주변기기의 기능을 실시간으로 구현하였다. SIMULATOR는 각 장치의 신호(속도신호, 승객하중 등)를 모의로 발생시켜 TCMS와 연계 동작함으로써, TCMS의 SOFTWARE LOGIC을 이용한 추진 및 제동제어 기법의 타당성 및 안전성을 검증하였으며 실시간 데이터를 CHART RECORD로 기록 및 출력 하였다. 또한 운전대의 MASTER CONTROLLER는 서울시 6호선에 실제 사용되는 것을 사용하였으며 모든 I/O 신호 및 기기간 통신 인터페이스는 6호선 사양을 적용하였다.

시뮬레이터의 Control & Interface부에서는 User Interface를 통해 Simulation하고자 하는 Point들과 그 제어 값들을 정의하고 그 값을 simulator module부로 보내는 일을 수행한다.

3.2 추진/제동제어 SIMULATION

먼저 Simulator를 이용하여 TCMS에 의한 추진차단조건을 검증하였다. 추진 차단 조건(제동체결 등)을 생성한 후 MASCON를 추진위치로 놓았을 때, 추진력이 0 (DU 화면에서 가감속표시가 N으로 표시)이 되는지를 확인한 결과 정상적으로 추진차단이 됨을 확인하였다.

추진/제동력 시험은 만차 및 공차조건에서 수행하여, 정상적인 추진력 및 제동력(BLENDING 제어)을 TCMS가 출력하는지를 확인하였다. 그림 5, 6 및 7은 그 시험 결과를 나타낸다. 그림 5는 만차 상태에서 MASCON에 의한 추진명령시(N->P4) TCMS에 의한 VVVF INVERTER로의 추진력 및 제동명령시(N->B7) 인버터에 의한 전기 제동력과 공기 제동장치에 의한 공기 제동력(M, T차) 제어 PATTERN을 나타낸다. 그림에서 나타난 것 처럼, 요구된 추진력 및 제동력이 표 1의 값과 비교하여 정확히 출력되는 것을 볼수 있으며 TCMS에 의한 전기/공기의 제동 BLENDING 제어가 정확히 이루어짐을 알 수 있다.

만약 편성중 한 량(T1차)의 제동장치가 고장시, TCMS는 요구제동력에 대한 부족분을 정상인 전차량으로 균등하게(고장인 T1차에 해당하는 제동 % (BP:11.2%)를 나머지 3개의 MT쌍에 33%씩 더해서 전달) 분산 제어하여, 전체 요구제동력을 얻도록 설계하였다. 이렇게 함으로써, 기존 RELAY / HARDWIRE 방식에서의 MT쌍의 한 제동장치 고장시 MT쌍안에서만 부족분을 더하여 제동을 체결함으로써 인하여 발생하는 열차 저크에 의한 승차감 저하를 방지할 수 있다. 이와 같은 제동보상에 대한 시험

결과를 그림 6에서 보여준다. T차(TC1차) 및 M차(M1차)의 공기 제동력이 같은 조건(만차, B7)에서 시험한 그림 5와 비교하여 보상분에 해당하는 만큼 더 큰 값으로 제어됨을 볼 수 있다.

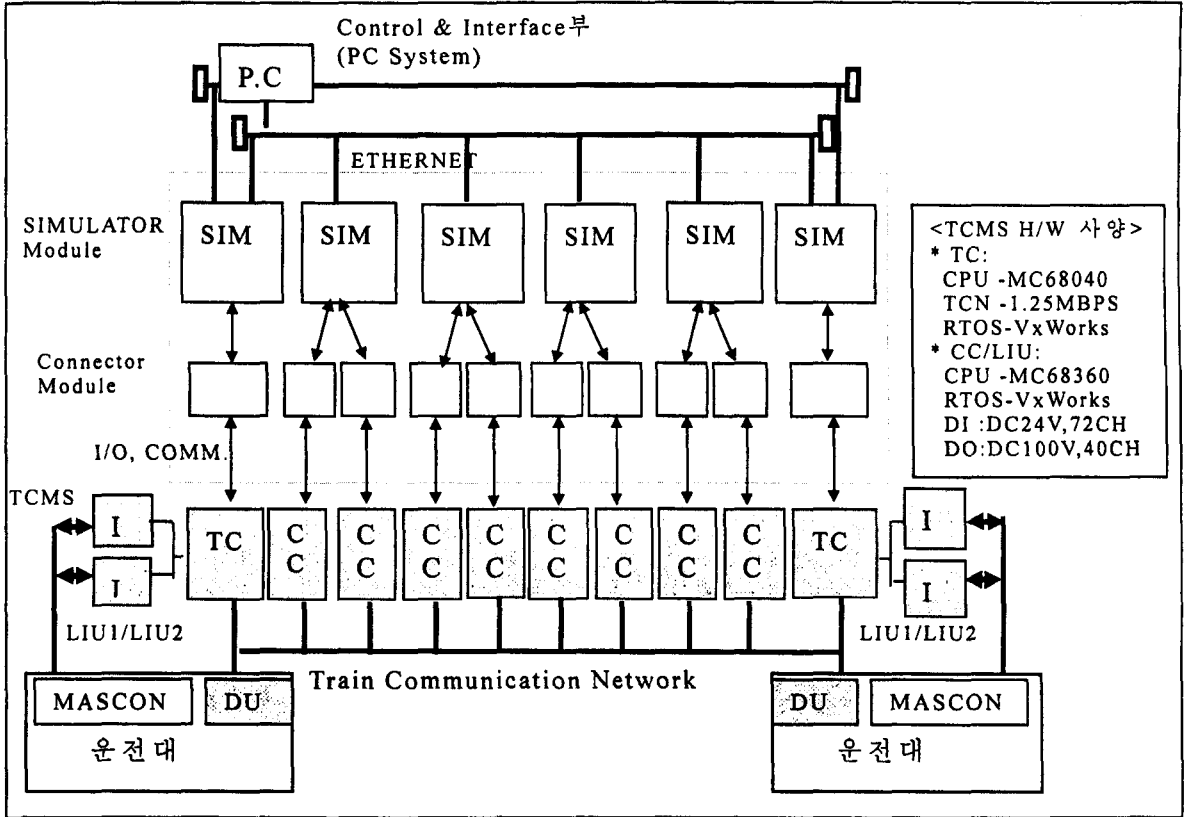


그림 4. TCMS 및 TCMS SIMULATOR 연결도

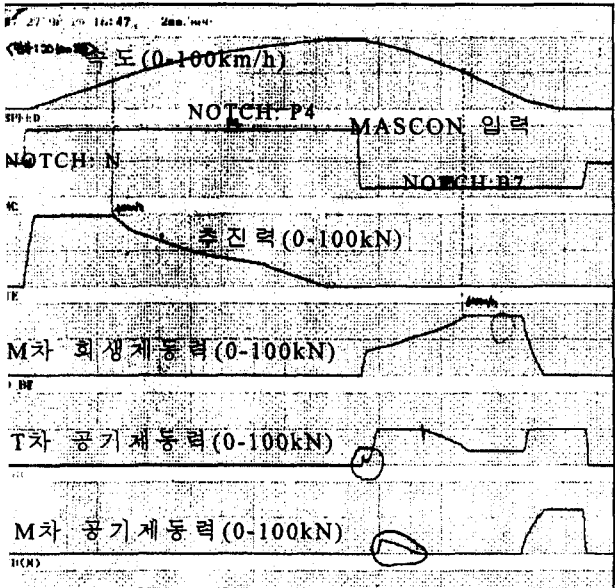


그림 5. 추진력/제동력 제어시험
(만차, TC1M1, 정상조건)

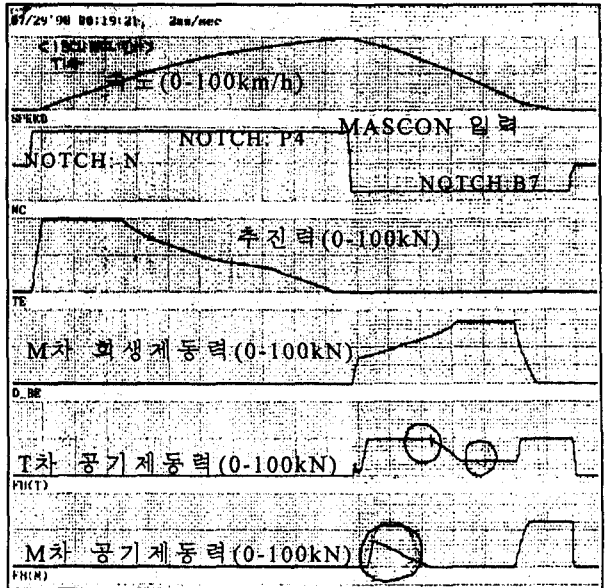


그림 6. 추진력/제동력 제어시험
(만차, TC1M1, 1BCU CUT)

VVVF 인버터의 회생 제동시 가선이 비수용성일 때 또는 기타 회생불가능 조건에 있을 때, VVVF 인버터는 회생 CUT-OUT 신호를 TCMS로 전송한다. 이때 TCMS는 즉각적으로 M, T 차의 공기제동력을 상승시켜 요구제동력(B7)을 충족토록 제어한다.

그림 7은 열차속도 40km/h 지점에서 TCMS가 인버터의 회생 CUT-OUT 신호를 수신한 경우에 대한 TCMS 추진/제동 제어 모의시험를 보여주고 있다.

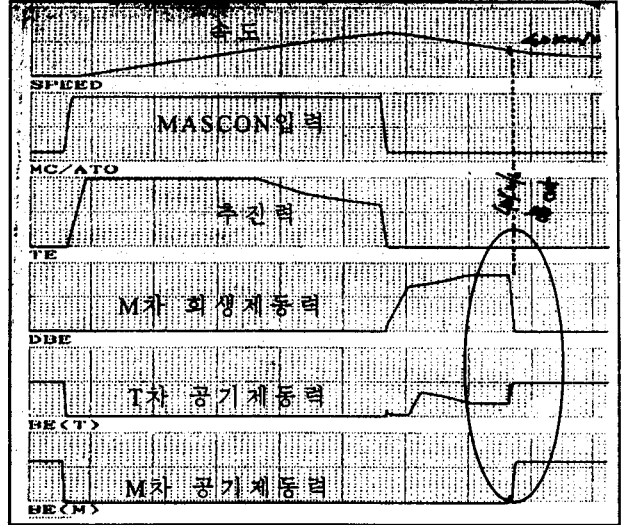


그림 7. 회생 CUT-OUT 시험(만차, TC1M1)

4. 결 론

본 연구에서는 최근 열차운행제어의 핵심과제인 TCMS에 의한 추진/제동 제어기법을 제안하고, 이를 모의시험하여 타당성을 검증하였다. 향후과제로서 6호선 전동차에 현차 취부, 공장구내 및 본선에서의 현차 성능시험을 수행하여 제어 PARAMETER의 TUNNING 과정 및 제어시간 조정 등이 필요하며, 이렇게 함으로써 적용 실적을 요구하는 수요자의 요구를 만족시키는 것이 필요하다.

참고문헌

1. 현대정공(1993), SMSC 과천선 정비지침서 1권
2. 현대정공(1991), 전동차 제동장치 및 운전특성
3. 현대정공(1997), 서울시 6호선 열차성능(견인력 및 제동력 계산)
4. 현대정공(1997), 서울시 6호선 제동력 계산서