

지연시간이 고려된 CAN 기반 피드백 제어시스템의 한국형 고속전철 여압시스템 적용

곽권천, 김홍렬, 김주민, 김대원
명지대학교 정보제어공학과

CAN-based Feedback Control System Applied to Korean high-speed Train Pressurization System considering Network Delay

Kwon-Chon Kwak, Hong-Ryeol Kim, Joo-Min Kim, Dae-Won Kim

Dept. of Information Control Engineering, MyongJi Univ.

Abstract- In this paper, CAN-based feedback control system is proposed for the pressurization system of korean high-speed train. The control performance of the system is evaluated. According to the requirement of the pressurization system A process model considering network delay and an adaptive PID control method based on the process model are proposed here. And it is shown that the proposed adaptive PID control method considering the network delay has an adequate feature compared to some other existing methods, consequently it can be considered to be applied the pressurization system of korean high-speed train.

1. 서 론

본산 네트워크 기반의 제어시스템 구성시 발생하는 지연시간은 시스템을 불안정하게 만드는 요소로 작용한다. 네트워크 지연시간의 정량적인 분석을 위해 Tindell 과 Burms [1,2]는 통신 중단간(end to end communication) 메시지 전송에서 발생하는 지연요소를 네 가지로 분석하여 지연시간의 수학적 모델링을 수행하였고, 이러한 수학적 모델을 CAN 프로토콜에 적용하여, 통신상에 발생하는 지연시간에 대한 분석을 수행하였다[3,4]. 네트워크 지연이 고려된 제어기 설계를 위해 전종만은 시스템 설계시 최악의 지연시간의 고려하여 시스템 안정화에 대한 연구를 수행하였고[5] Alexandre는 평균 지연시간을 고려하여 일반적인 제어기의 성능 분석에 관한 연구를 수행하였다[6].

하지만 위의 논문들이 연구한 최악 지연 혹은 평균 지연시간은 제어기 수행시 지연시간의 대표값이 될 수 없으며 더욱이, 목표값이 시간에 따라 빠르게 변동하는 시스템에는 적합하지 않는 단점을 갖는다.

이에 본 논문에서는 목표값이 시간에 따라 변동하는 한국형 고속 전철의 여압시스템에 CAN 기반 피드백 제어 시스템을 적용할 경우를 가정하여 제어 성능이 시스템 요구사항을 만족하는지 여부를 분석한다. 제어 성능비교 대상으로는 지연시간이 고려되지 않은 제어기, 최악의 응답시간이 고려된 제어기[5] 그리고 평균 지연시간을 고려한 제어기[6]를 선정하여 본 논문에서 제안한 제어기가 CAN기반 피드백 제어 시스템 가장 적합한 방식임을 입증하였다.

본 논문의 2장에서는 지금까지 연구되어온 CAN 프로토콜의 특성과 지연시간에 대한 수학적 모델에 관해 기술한다. 3장에서는 한국형 고속 전철의 여압 시스템과 네트워크 지연시간이 고려된 PID제어기 설계를 수행한다. 여기서 PID 제어기 설계를 위해 분석적 튜닝 방법을 사용

한다. 4장에서는 모의실험을 하고 마지막으로 5장에서 이 논문의 결론을 도출한다.

2. CAN 프로토콜의 특성과 지연시간

2.1 CAN 프로토콜의 특성

CAN 통신 프로토콜은 디바이스들간의 정보 교환 방식을 ISO의 OSI 참조 모델 7개 계층 중에 하위 2계층인 데이터링크 계층과 물리 계층을 정의하고 있다[8]. CAN 프로토콜은 데이터 링크 계층에서의 CSMA/AMP (Carrier Sense Multiple Access /Arbitration on Message Priority) 방식을 사용하며 식별자를 통한 사전 스케줄링이나 시스템 운영시의 동적으로 우선 순위 스케줄링이 가능하다.

2.2 CAN 통신 지연시간

CAN 통신간 발생하는 지연시간은 크게 계산지연시간과 통신지연시간으로 구분할 수 있다[8].

2.2.1 계산 지연시간

계산지연시간은 소프트웨어 지연시간과 하드웨어 지연시간으로 구성된다. 소프트웨어 지연시간은 피드백 제어 알고리즘을 처리하기 위한 CAN API 수행, 그리고 메시지 전송과 수신 처리를 위한 ISR(Interrupt Service Routine)로 구성되며 수행시간은 프로세서의 CPU 한계에 수행할 수 있는 명령어 처리 능력에 의존한다. CAN 인터페이스의 하드웨어 지연시간은 CIA의 자료[7]에 의하면, 아주 작은 시간이 소요되며 상수로 가정할 수 있다.

2.2.2 통신 지연시간

통신지연시간은 미디어 접근 지연시간과 전송지연시간으로 이루어진다. 미디어 접근 지연시간은 메시지가 미디어를 점유하기 위해 대기하는 시간이다. 따라서 전송하는 메시지 보다 상위 우선순위를 갖는 메시지가 전송되는 시간만큼 지연된다. 최악의 경우 각 노드의 메시지들은 동일한 순간에 발생된다고 하면, 모든 메시지의 실행시간은 직렬화(serialization)가 이루어지면서 실행이 된다. 낮은 우선순위에 의한 블록킹 시간(blocking time)은 고려하지 않는다면[8], 전송지연시간의 수학적 모델은 식(1)와 같다[3].

$$C_m = \left(\left[\frac{34 + 8s_m}{5} \right] + 47 + 8s_m \right) r_{bit} \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 C_m 은 전송 지연시간, s_m 은 메시지 크 기 그리고 t_{bit} 은 1비트를 전송하는데 걸리는 시간을 나타 낸다(3).

따라서 메시지 처리를 위한 피드백 제어 루프의 지연시 간은 식(2)과 같이 정의될 수 있다.

$$t_{fcl} = 2 \times (t_{comp} + t_{prop} + (Cm \times Pm)) + t_{cp} \quad (2)$$

위 식(2) t_{fcl} 은 피드백 제어 실행시간을, t_{comp} 은 소프트 웨 의한 계산지연시간을, t_{prop} 은 하드웨어적인 요소에 의 한 계산지연시간을, Pm 은 우선 순위를, 그리고 t_{cp} 는 제 어 프로세스를 처리하는데 걸리는 시간을 나타낸다. 위의 식은 일반적인 식으로 정의되었지만, 정확히 정의하자면 통신지연시간은 메시지의 출발 노드와 목적 노드의 우선 순위에 따라 지연시간이 달라지기 때문에 각 노드의 우선 순위를 고려하여 지연시간을 계산해야 하며 메시지에 대 한 우선순위의 할당은 사전 스케줄링 방법에 따라 정해진다.

3. 한국형 고속 전철 여압시스템 제어기 설계

3.1 한국형 고속 전철 여압시스템 CAN 기반 제어기

네트워크를 기반으로 하는 제어기에서 발생하는 지연시 간은 제어기 구조에 따라 다르게 나타난다(8). 본 논문에서 는 한국형 고속전철의 여압 시스템의 제어부를 그림 1 과 같이 주 컨트롤러부, 센서부, 구동부 그리고 관리 모 니터링부로 이루어진 네트워킹 시스템으로 가정한다. 주 컨트롤러부는 센서로부터 들어오는 피드백 정보와 레퍼런스 값을 비교하여 여러 값을 보정하기 위한 프로세스 처 리를 담당한다. 센서부는 압력 정보 측정을 위한 센서로 구성되며 관리 모니터링부는 챔버의 압력을 모니터링 한 다(9). 네트워크 기반 피드백 제어시스템 구성시 메시지 지연시간이 발생하는 위치는 센서로부터 컨트롤러, 컨 트롤러에서 액츄에이터부 그리고 컨트롤러에서 관리 모니 터링으로 전송시에 발생한다.

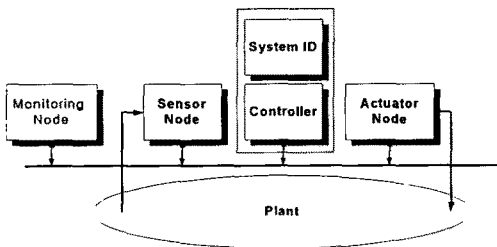


그림 1. CAN 기반 분산 네트워크 시스템 구조도

시스템의 전송 메시지는 표 1 처럼 정의하고 메시지 사 전 스케줄링 방법은 RMS 기법을 사용한다(10).

표 1. 메시지 정의

시작 노드	종단 노드	주기	크기	전송 속도
센서	컨트롤러	2ms	4byte	125k/bps
컨트롤러	액츄에이터	5ms	8byte	125k/bps
컨트롤러	관리 모니터링	10ms	16byte	125k/bps

3.2 분석적 튜닝 모델 이용한 PID 제어기 설계

플랜트 전달함수 $g_p(s)$ 는 그림 3의 최고 압력 도달 곡 선에서 3가지 변수 모델을 이용하여 구한다(10).

$$g_p(s) = \frac{K}{1+sT} e^{-sL} \quad (3)$$

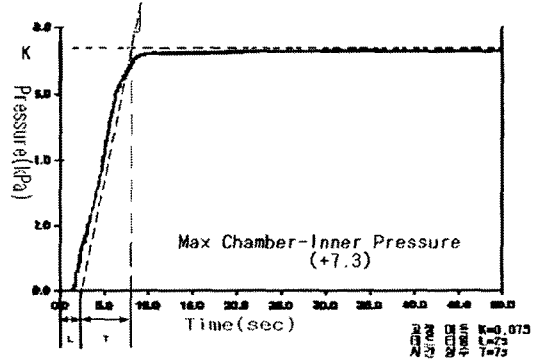


그림 2. 계단 응답 곡선

식(3)의 $g_p(s)$ 에 지연시간이 고려된 플랜트의 전달함수는 식(4)이다. 이때 플랜트의 전달함수 D1은 센서부에서 컨 트롤러부와 같고 D2 컨트롤러부에서 구동부 전송되는데 걸리는 네트워크 지연시간이다.

$$Gp(s) = \frac{0.073}{1+sT} e^{-s(L+D1+D2)} \quad (4)$$

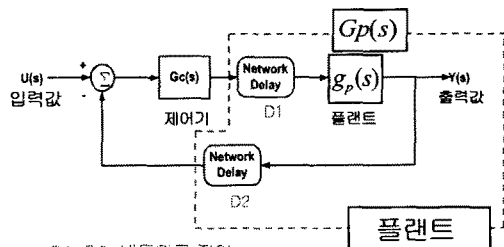
이상적인 전달함수 $G_I(s)$ 는 식(5)과 같이 설정하여 Haalman method를 이용하여 PID 제어기 $G_c(s)$ 는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$G_I(s) = \frac{2}{3LS} e^{-sL} \quad (5)$$

$$G_c(s) = \frac{G_I}{G_p} = \frac{2+2T(D_1+D_2)s+(T+D_1+D_2)s^2}{3KLS}$$

$$= \frac{14+2D_1+2D_2}{0.426} + \frac{2}{0.426s} + \frac{7(D_1+D_2)s}{0.426} \quad (6)$$

식(6)에 의하면 PID 제어기의 P계수값과 D계수값이 네 트워크 지연시간에 의하여 결정된다.



D1, D2=네트워크 지연

그림 3. 피드백 제어루프의 블록선도

4. 모의 실험 및 결과 분석

시스템의 피드백 제어 응답 특성을 살펴보기 위해서는 각각의 노드에 따른 우선순위를 할당한다. 따라서 주 컨트롤러가 가장 우선순위가 높고 그 다음으로 센서 그리고 액츄에이터와 관리모니터링 순으로 할당한다. 네트워크 지연 시간은 본 논문의 3장 메시지 정의에 따라 모의실험을 하였다. 그림 5는 여압 시스템 압력 변동률을 나타낸 것으로 변화가 가장 큰 지점은 33.874s부터 36.718s 사이로 이때 압력 변화가 1.8975kPs이며 정착 시간은 2.844s를 만족해야 한다.

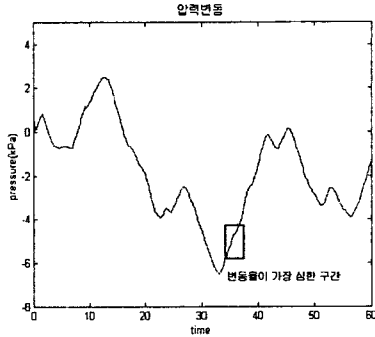


그림 5 출력값 압력 변동

그림 6은 결과 지연시간이 고려되지 않은 제어기, 최악의 응답시간을 고려한 제어기, 평균 지연시간을 고려한 제어기 그리고 분석적 PID 제어기의 모의 실험 결과이다.

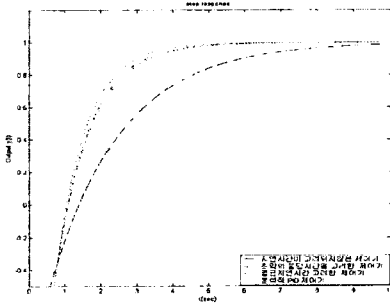


그림 6 모의 실험 결과

그림 6에서와 같이 PID 계수값을 조정하는 분석적 PID 제어기가 가장 성능이 나쁜 지연 시간이 고려되지 않은 제어기보다 약 3.17s 성능이 우수함을 알 수 있었다.

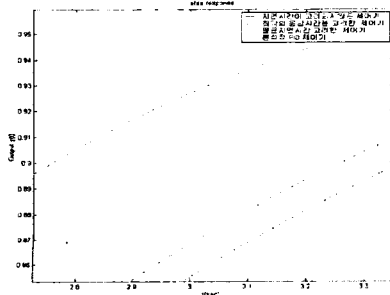


그림 8 출력값 90% 그래프

아래의 표 1에서처럼 분석적PID 제어기의 정착시간은 2.754s로 시스템 설계 사양을 만족하였다.

표 1. 시스템 응답 곡선의 정착시간

제어기 구분	정착시간[s]
지연시간이 고려되지 않은 제어기	5.93
최악의 응답시간을 고려한 제어기	3.268
평균 지연 시간이 고려된 제어기	3.37
분석적 PID 제어기	2.754

5. 결 론

본 논문에서는 네트워크 기반 분산제어 시스템의 지연시간에서 지연시간 모델을 기초로 지연시간이 포함된 플랜트를 설계하여 분석적 PID 튜닝을 통하여 설계된 제어기에 지연시간이 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 그리고 모의 실험 결과 네 가지 제어기에 중 분석적 PID 제어기가 설계 사양을 만족한다. 향후에는 네트워크 지연시간을 글로벌 클락 제어 수행시에 측정하기 위한 방법으로서 글로벌 클락 동기화를 위한 구현 방식 및 오버헤드에 관한 연구를 수행할 예정이다.

(참고 문헌)

- [1] K. W. Tindell, A. Burns, and A. J. Wellings, "Guaranteeing Hard Real-Time End-to-End Communications Deadlines," *RTRG/91/107*, Department of Computer Science, University of York, 1991.
- [2] K. Tindell, A. Burns, "Analysis of Hard Real-Time Communications," *Technical report YCS 222*, Department of Computer Science, University of York, England, Jan 1994.
- [3] K. Tindell, A. Burns, "Guaranteed Message Latencies for Distributed Safety-Critical Hard Real-Time Control Networks," *Technical report YCS 229*, Department of Computer Science, University of York, England, May 1994.
- [4] K. Tindell, A. Burns, and A. Wellings, "Calculating Controller Area Network(CAN) Message Response Times," *Technical Report Y01 5DD*, Department of Computer Science, University of York, 1995. Available on line: <http://cs.york.ac.uk>.
- [5] J. M. Jeon, and D. W. Kim, "An Analysis of Network-based Control System Using CAN(Controller Area Network) Protocol," *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, vol. iv, pp. 3577-3581, May 2001.
- [6] Alexandre Manuel Mota, Jose Alberto Fonseca, "D-ealing with jitter in Systems Modelling and Identification" Departamento de Electronica e Telecomunicacoes, Universidade de averio, 3800 Aveiro, Portugal
- [7] CAN in Automation(CiA), "Implementation", <http://www.can-cia.de/CANimpl.pd>
- [8] 전종만, 김대원, "메시지 지연시간을 고려한 CAN 기반 피드백 제어 시스템의 응답특성 분석", 명지대학교, 2001. 12
- [9] 한국기계연구원, 캐리어 주식회사, "고속전철용 HVAC 및 여압시스템 기술 개발 (2단계 연차 보고서)", pp. 1-38, 2001. 10.
- [10] John Lehoczky, Lui sha, "The Rate Monotonic Scheduling Algorithm: Exact Characterization And Average Case Behavior", Real Time Systems Symposium, 1989, Proceedings. pp 166-171
- [11] karl J. Astrom, tore hagglund, "PID Controllers, 2nd Edition", pp.5-1998,