

실시간 신호제어시스템에서의 SA 설정방안 연구

Sub Area Planning Method Study for COSMOS

김 상 윤

(서울시립대, 석사과정)

김 호 빈

(서울시립대, 석사과정)

이 영 인

(서울시립대, 교수)

이철기

(서울시경)

목 차

I. 서론

II. 현황분석 및 문헌고찰

III. SA 설정 및 운영방안 제시

IV. SA운영 방안의 평가

V. 결론 및 향후 연구과제

참고문헌

I. 서론

서울시는 날로 심화되는 교통난을 해소하기 위해 실시간 신호제어시스템(COSMOS)을 개발하였다. 1991년~1993년에 개발된 이 시스템은 이후 현장실험과 실제 운영을 통해 효용성이 입증되었으며, 현재는 강남지역 및 성산수색로에 이르는 총 409개소에 설치되어 있다.

그러나 아직까지 중요교차로(Critical Intersection, CI)의 선정기준 미흡으로 해당 사업마다 각각 다른 기준이 사용되고 있으며, 운영자의 공학적 판단에 의존하여 지정되고 있다. 또한, 이 시스템은 제어그룹(Sub Area, SA) 설정과 운영 전략상에서 교통패턴의 변화에 효율적으로 대응하지 못하고 있는 등 몇 가지 문제점이 드러났다.

본 연구에서는 교통패턴의 변화에 효율적으로 대응할 수 있도록 실시간 신호제어시스템의 제어그룹과 중요교차로 설정기준 제시하고자 한다. 이와 더불어 제어그룹의 운영방식을 개선 하고, 개선된 알고리즘의 적정성을 분석하고자 한다.

II. 현황분석 및 문헌고찰

1. SA 운영 현황분석

현황분석은 1991년~2001년까지의 실시간 신호제어 관련 사업 및 연구 중 SA 관련사항만을 참고로 실시하였다. 현황분석의 범위는 CI 및 SA 설정기준, SA 운영 및 결합분리, 결합시 SA운영이며, 그 내용은 <표 1>과 같다.

<표 1> 현재의 제어그룹 설정 및 운영방식

구 분	내 용
CI 설정기준	<ul style="list-style-type: none"> • 교통혼잡이 시작되는 교차로로서 운영자의 판단에 의한 사전 정의 • 교차도로의 위계, 처리능력, 기하구조 등을 고려한 점수제 사용 및 전문가의 의견을 수렴하여 설정
SA 설정기준	<ul style="list-style-type: none"> • SA는 1~10개 교차로로 구성 • SA는 한개의 중요교차로를 포함하고, 이외의 교차로는 비중요교차로로 정의 • 교통상황이 유사한 교차로 그룹을 SA로 설정 • SA 설정은 가능한 연속되는 노선상에 구성, 운영자의 사전정의
SA 운영	<ul style="list-style-type: none"> • 운영자가 CI 사전 정의 • CI가 주기와 신호시간계획 설정 • 큰 규모의 SA 단위로 운영자가 사전 설정
SA 결합분리	<ul style="list-style-type: none"> • 주기차 10초 이내면 결합, 10초 이상이면 분리 • 교통패턴에 따른 결합 분리 (inbound, outbound, balanced)
결합시 SA운영	<ul style="list-style-type: none"> • 주기가 큰 SA의 주기와 신호시간계획에 맞춤 • E-W, S-N 중 한 축만 연동하여 운영

2. 문헌고찰 및 개선방향

본 연구에서는 가장 널리 운영되고 있는 호주의 SCATS과 영국의 SCOOT을 중점적으로 고찰하였다. SCATS과 SCOOT은 SA의 설정과 운영의 개념적인 측면에서 매우 유사하다.

이 두 시스템은 CI 설정시 DS가 가장 높은 교차로를 대상으로 선정하고 있으며, 제어그룹은 교통상황이 유사한 교차로들을 대상으로 설정하고 있다. 또한 SA의 운영과 결합시 SA 운영은 실시간 신호제어시스템과 유사하다. 그러나 SA 결합분리에서 외국의 시스템은 E-W와 S-N 두축 모두 연동이 가능하도록 설정되어 있다. 이들 외국 시스템의 장단점과 실시간 신호제어시스템의 운영현황을 고려하여 <표 2>와 같이 개선방향을 제시하였다.

〈표 2〉 실시간 신호제어시스템의 개선방향

구분	실시간 신호제어시스템
제어형태	• 실시간 신호제어시스템의 상황을 고려하여 제어형 분산구조 유지
CI결정	• SCATS과 SCOOT의 조건을 고려하고, 우리나라 상황에 맞는 CI 선정기준 도출 필요
SA 설정	• SA 설정기준을 교통패턴의 변화에 효율적으로 대응할 수 있도록 수정 및 보완
SA 운영	• SCATS과 유사한 형태이며, 전체적인 개념은 SCOOT도 유사한 형태로 운영중 • 교통량 변동에 따른 잦은 업데이트의 예방 수단 필요
SA 결합분리	• 결합 및 분리 조건은 SCATS과 SCOOT의 조건이 더 효율적이므로 E-W, S-N 두축 모두 연동 가능하도록 추가
결합시 SA운영	• 결합시 DS가 큰 SA의 주기에 맞추는 방식 유지

III. SA 설정 및 운영방안 제시

1. CI 설정방안 제시

본 연구에서 제시하는 CI 설정은 3단계로 분류되어 단계별로 수행된다. 먼저 1단계는 대상지역의 각 교차로별 기하구조, 포화도 및 교통량, 정지지체등 계량적인 지표를 사용하여 CI를 설정하는 단계이다. 다음의 2단계는 주요 도로이외의 도로들에 대한 연동과 효율적인 SA 결합분리를 고려하여 CI를 결정하는 단계이다. 마지막 3단계는 1, 2단계에서 설정된 CI들에 대해 전문가가 직접 검토하는 단계이다. 위의 단계를 통해 설정된 CI는 SA의 운영 상황에 따라 CI 및 SCI(준중요교차로)로 운영된다.

CI설정의 3단계는 다음의 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉 CI 설정방안 제시

구분	CI 설정방안
1단계	• 교통 소동 특성에 따른 CI 설정 ①, ②, ③ 모두 만족하는 신호교차로를 CI 설정 ① 편도 3차로 이상(주간선도로)의 주요도로가 서로 교차하는 신호교차로 ② 첨두시 포화도가 0.9 이상인 신호교차로 ③ 첨두시 서비스수준이 D이상인 신호교차로
2단계	• 도로망 환경 특성에 따른 CI 설정 및 확정 - ①과 ②, 또는 ①과 ③을 만족하는 경우 - 편도 3차로 도로와 2차로 도로가 교차하는 경우 - 교차로 서비스수준이 E이상인 신호교차로 ※ 2단계 조건 중 연동효과의 효율성을 향상시킬 수 있는 경우에 한해 선택적으로 결정한다.
3단계	• 전문가의 판단에 의해 CI 설정 검토

2. SA 설정방안 제시

본 연구에서 제시하는 SA 설정은 CI 설정과 유사한 3단계 이루어진다. 먼저 1단계에서는 설정된 CI를 토대로 인근 교차로간의 연동방향과 주기길이를 고려하여 SA를 설정하는 단계이다. 다음의 2단계는 가로망 내에서 SA간의 결합분리시 연동효율성을 감안하여 제어그룹을 설정하는 단계이다. 마지막 3단계는 1, 2단계에서 설정된 소규모 SA를 토대로 각 SA간의 연동성과 전반적인 교통상황을 고려하여 운영 SA를 설정하는 단계이다.

1, 2단계의 소규모 SA설정의 장점은 운영 SA의 변동이 용이하게 하며, 다양한 형태의 운영 SA를 형성가능하다는 것이다.

SA설정 단계는 다음의 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉 SA 설정방안 제시

구분	SA 설정방안
1단계	• 교통 소동 특성에 따른 SA 설정 - 각 교차로의 이동류중 포화도가 가장 큰 이동류들 간의 연동이 가능한 교차로 그룹 - 교통량에 따른 평균 주기차가 ±10초 이내인 교차로 그룹
2단계	• 가로망 환경 특성에 따른 SA 설정 - 가능한 간선도로의 축상에 연속되도록 설정 - 최소 1개 CI, 최대 10개 교차로로 구성 - 효율적인 SA결합 분리를 수행할 수 있는 소규모 교차로 그룹 - SA 결합 분리에 의해 주간선도로 방향과 교차도로 방향으로 연동이 용이한 교차로 그룹 - 거리가 600~800m이내로 신호연동효과가 있는 교차로 그룹
3단계	• 소규모 SA를 토대로 운영 SA 설정

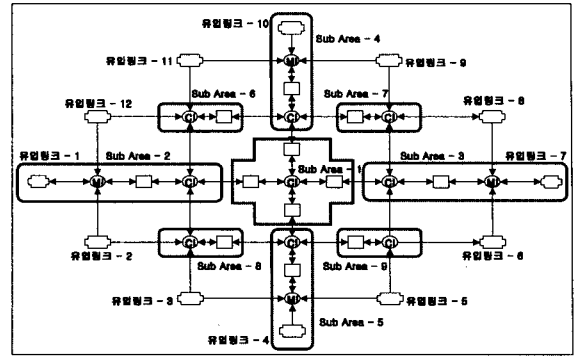
3. SA 결합분리 알고리즘 제시

기존의 실시간 신호제어시스템은 SA 결합분리시 동서와 남북 방향 중 한쪽 축으로만 결합 분리가 가능하였다. 이는 주요간선도로가 교차하는 상황에서 주요 연동축의 변화가 요구되어도 허용할 수 없는 방식이다. 따라서, 기존의 SA 결합분리 알고리즘을 〈표 5〉와 같이 제시하였다. 본 연구에서는 먼저 SA 운영부분에서 소규모 SA를 운영SA로 설정하는 단계를 제시하였다. SA 결합분리 부분에서는 결합가능 SA의 결합가능 시간대의 설정이 추가되었으며, 결합시 SA 운영에서는 동서와 남북 방향 모두 연동이 가능하도록 개선되었다.

본 연구에서 제시한 알고리즘을 실시간 신호제어시스템에 적용하기 위해 요구되는 사항은 〈표 6〉과 같다.

〈표 5〉 SA 운영방안 제시

구분	내용
SA 운영	<ul style="list-style-type: none"> • 운영자가 CI 사전 정의 • CI에 의한 주기와 신호시간계획 설정 • 소규모의 SA 설정후 운영자가 운영 SA 사전 설정
SA 결합 분리	<ul style="list-style-type: none"> • 주기차 10초 이내면 결합, 10초 이상이면 분리 • 교통패턴(inbound, outbound, balanced)에 따른 결합 분리 • 결합가능 SA의 결합가능 시간대 설정
결합시 SA 운영	<ul style="list-style-type: none"> • 결합시 주기가 큰 SA의 주기와 신호시간계획에 맞춤 • E-W, S-N 두 축 모두 연동 가능하도록 운영



〈그림 1〉 네트워크의 SA 및 교차로구성

〈표 6〉 시스템 수정 요구사항

대상	수정 내용
소스파일	<ul style="list-style-type: none"> • 연동축 변화시 SCI와 MI는 자신이 속한 축방향의 옵션값을 선택 • 연동축의 변화는 부방향 축의 교통량이 주방향 축보다 일정기준 이상일 경우에만 수행
그룹결합테이블	<ul style="list-style-type: none"> • 각 SA별로 결합분리 가능시간을 결정하는 항목 추가 <ul style="list-style-type: none"> - 결합 불가 - 0~24시중 일부 시간대만 결합 가능 - 항상 결합 가능
결합가능 시간 테이블	<ul style="list-style-type: none"> • 각 SA별로 0~24시중 결합 가능한 일부 시간대를 설정할 수 있는 새로운 테이블 추가

주) MI(Minor Intersection, 비중요교차로)

IV. SA 운영전략 평가

본 연구에서 제시한 SA 운영전략은 실시간 신호제어시스템 평가용 시뮬레이터⁵⁾를 이용하여 평가되었다.

1. Network의 구성

대상 network의 구조는 13개 신호교차로와 11개 횡단보도, 9개의 SA 동서와 남북방향으로 각각 3개의 축으로 설정하였다.

대상 network의 SA는 총 9개로 구성되었으며, 9개의 CI와 4개의 MI로 이루어졌다. 이러한 구조는 동서와 남북방향으로 변화하는 교통상황에 대한 교차로별 평가가 가능하도록 설정된 것이다. 〈그림 1〉은 대상 network의 기하구조와 SA 구성을 나타낸 것이다.

2. SA운영 전략 평가

1) 입력자료 및 신호관련변수

실험 network의 교통량은 〈표 7〉과 같고, 교차로간의 옵션은 T7F를 통해 산출하였다. 실험의 전반부는 동서축의 교통량이 많아 동서방향으로 SA 결합이 이루어지고, 후반부에는 남북방향으로 SA 결합이 이루어지게 된다.

〈표 7〉 링크별 입력 교통량

시간대	동서축 유입링크	남북축 유입링크
0:00-0:15	1600	800
0:15-0:30	1600	800
0:30-0:45	1600	800
0:45-1:00	800	1600
1:00-1:15	800	1600
1:15-1:30	800	1600
1:30-1:45	800	1600
1:45-2:00	800	1600
회전비율	직진:90%, 좌회전:10%	

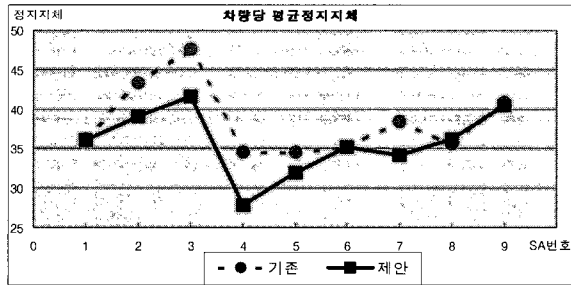
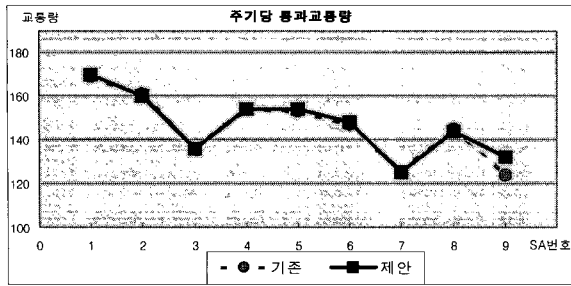
2) 실험결과 분석

기존의 SA운영 방안과 본 연구에서 제시한 SA운영 방안의 결과는 〈표 8〉과 〈그림 2〉와 같다. 개선된 SA 운영 방안은 2, 3, 4, 5번 SA내의 CI 지체도가 감소하였으며, 이는 교통량의 변동에 따라 연동축이 적절히 변화하였기 때문이다.

〈표 8〉 각 SA내의 CI별 효과적도 비교

SA 번호	주기당 통과교통량(대)		차량당 평균정지지체(초)	
	기존방식	개선방식	기존방식	개선방식
1번	169	170	36.19	36.13
2번	161	160	43.52	39.07
3번	136	136	47.51	41.62
4번	154	154	34.52	27.81
5번	153	154	34.48	31.95
6번	147	148	35.14	35.12
7번	125	125	38.42	34.09
8번	145	144	35.52	36.25
9번	124	132	40.80	40.43

5) 한동희, “尖端 信號시스템의 信號制御戰略 평가를 위한 微視的 시뮬레이터의 開發”, 서울시립대학교 석사학위 논문 2002



〈그림 2〉 각 SA내의 CI별 효과척도 비교

3. 교통량변동시 읍셋전이의 평가

1) 입력자료 및 신호운영변수

대상 network와 신호운영변수는 SA 운영전략과 동일하다. 교통량은 유입링크를 주축링크와 부축링크로 구분하여 입력하였으며, 연동축 교통량이 15분단위로 변화하게 입력하였다. 입력 교통량은 다음의 〈표 9〉와 같다.

〈표 9〉 읍셋전이 실험의 입력교통량

시간대	동서 방향		남북 방향	
	주축링크	부축링크	주축링크	부축링크
0:00-0:15	1400	1200	800	700
0:15-0:30	800	700	1400	1200
0:30-0:45	1400	1200	800	700
0:45-1:00	800	700	1400	1200
1:00-1:15	1400	1200	800	700
1:15-1:30	800	700	1400	1200
1:30-1:45	1400	1200	800	700
1:45-2:00	800	700	1400	1200
회전비율	직진:90%, 좌회전:10%			

2) 실험결과 분석

이번 실험의 목적은 본 연구에서 제안한 SA운영 알고리즘이 연동축 변화요구 교통량비(x)⁶⁾값에 따른 읍셋전이의 정도를 평가하는 것이다. x 값에 따라 읍셋전이의 횟수가 달라지므로 현장실험을 통해 적정값을 설정해야 할 것이다. 실험의 결과는 〈표 10〉과 같다.

〈표 10〉 x 값에 따른 읍셋전이

SA 번호	$x = 1.0$				$x = 1.2$			
	결합	전이	분리	전이	결합	전이	분리	전이
6	4회	4주기	3회	6주기	4회	4주기	3회	6주기
7	3회	3주기	3회	3주기	3회	3주기	3회	3주기
8	4회	4주기	3회	3주기	4회	4주기	3회	3주기
9	4회	4주기	3회	3주기	4회	4주기	3회	3주기

SA 번호	$x = 1.5$				$x = 1.8$			
	결합	전이	분리	전이	결합	전이	분리	전이
6	2회	2주기	2회	4주기	1회	1주기	1회	2주기
7	3회	3주기	2회	2주기	2회	2주기	1회	1주기
8	2회	2주기	2회	2주기	1회	1주기	1회	1주기
9	3회	3주기	2회	2주기	2회	2주기	1회	1주기

V. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 SA간의 결합분리가 연동축의 변화에 효율적으로 대응할 수 있도록 SA운영 방안을 제시하였다. 이는 시뮬레이션 분석결과 교차로의 정지체체를 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, CI와 SA 설정방안을 제시하였으며, 이때의 소규모 SA는 실제 운영에 있어 더욱 다양한 운영 SA의 조합이 가능해 질 것으로 사료된다. 향후 현장실험을 통하여 SA운영 방안의 검증과 수정이 수행되어야 한다.

참고문헌

1. 서울특별시, “교통신호제어시스템 기술개발”, 1991년~1993년
2. 서울지방경찰청, 도로교통안전협회, “신 전자교통신호시스템 개발 현장종합실험”, 1995
3. 서울지방경찰청, “신신호시스템 평가 및 기능개선 연구”, 1999
4. 서울지방경찰청, “2000년 신신호시스템 기능개선 연구”, 2001
5. 한동희, “尖端 信號시스템의 信號制御戰略 평가를 위한 微視的 시뮬레이터의 開發”, 서울시립대학교 석사학위 논문 2002
6. AKCELIK, R., BESLEY M., CHUNG, E., “An evaluation of SCATS Master Isolated control”, 1998
7. “http://www.dot.state.mn.us/guidestar/pdf/auscirep.pdf”
8. “Traffic Control System Handbook”, 1996

6) 연동축의 결합강도를 나타내는 변수

군집 선행차의 원격제어를 위한 통신 시퀀스 결정

Optimal Communication Sequence for Remote Control of Lead Vehicle

황 태 현

(부산대학교, 박사과정)

최 재 원

(부산대학교, 부교수)

목 차

I. 서론

II. 시스템 정의

III. 선도차 제어

IV. 최적 시퀀스 결정

V. 결론

I. 서론

AVHS(Advanced Vehicle and Highway System)(Varaiya, 1993)는 컴퓨터, 전자제어, 센서 등의 첨단 시스템을 이용하여 차량의 주행 안전 거리를 현저히 줄임으로써 도로상의 단위 시간당 주행할 수 있는 차량의 수를 증가시키는 것을 목표로 한다. 차량 충돌을 방지하면서 차량 사이의 간격을 현저히 줄일 수 있는 방안으로써 군집주행(platooning)이 매우 효과적인 것으로 알려져 있다(Sheikholeslam and Desoer, 1992; 1993). 하지만 군집주행은 10대 내외의 차량들이 집단을 이루는 군집에 대해서만 적용될 수 있다. 기존의 군집주행 장점을 그대로 유지하면서 도로 상의 전체 차량을 직접적으로 관리할 수 있는 시스템을 개발한다면 효과적인 AVHS를 구현할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 본 연구에서는 군집(platoon)의 선두에서 군집을 이끄는 선도차량(lead vehicle)을 원격지에 소재한 관제소(control station)에서 원격제어(remote control) 하는 방법에 대해 기술한다.

도로상의 차량은 속도의 변화가 없는 순항(cruise)과 가속을 가지는 기동 운동을 한다(Godbole and Lygeros, 1994; Huang 등, 2000). 군집의 병합(merge), 분리(split), 차선변경(lane change) 등과 같은 기동은 순항에 비해 급속한 제어입력의 변화를 필요로 한다. 또한 관제소는 각각의 차량에 필요한 서로 다른 제어입력을 송신하여야 하기 때문에, 통신 시스템이 가지는 대역폭이 이를 충분히 지원하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 그러나 도로상의 모든 차량들에 기동이 발생하는 것은 아니므로, 급격한 제어입력의 변화

가 발생하는 차량에 통신 자원을 보다 많이 할당함으로써 한정된 대역폭 내에서 효과적으로 전체 차량을 제어하는 시스템을 구성할 수 있다.

최근에 통신채널을 할당하는 문제가 활발히 연구되고 있다(Rehinder and Sanfridson, 2000; Lincoln and Rantzer, 2001). 본 연구에서는 차량의 효율적인 통행을 위한 원격제어 시스템의 구성을 목표로 두고 차량과 관제소간의 통신 채널의 할당을 위하여 통신 시퀀스를 결정하는 문제를 조사한다. 최적의 시퀀스는 최소 오차의 관점에서 시뮬레이션을 통하여 결정된다.

II. 시스템 정의

차량의 운동은 다음과 같은 3차의 비선형 미분 방정식으로 표현된다(Sheikholeslam and Desoer, 1993).

$$x_i^{(3)} = b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) + a_i(\dot{x}_i)w_i \quad (1)$$

$$a_i(\dot{x}_i) = \frac{1}{m_i \tau_i(\dot{x}_i)} \quad (2)$$

$$b_i(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) = -\frac{2K_{d_i}}{m_i} \dot{x}_i \ddot{x}_i - \frac{1}{\tau_i(\dot{x}_i)} \times \left[\ddot{x}_i + \frac{K_{d_i}}{m_i} \dot{x}_i^2 + \frac{d_{m_i}}{m_i} \right] \quad (3)$$

여기서, 아래첨자 i 는 도로상 i 번째 군집의 선도차량을 나타내고 x_i 는 임의의 고정된 기준점에 대한 차량의 위치를 나타낸다. m_i 는 차량의 질량, τ_i 는 엔진의 시상수(time constant)를, w_i 는 엔진입력을, K_{d_i} 는 공기항력 계수(aerodynamic drag coefficient)를, 그리고 d_{m_i} 는 기계적 항력(mechanical drag)을 각각 나타낸다.

본 논문에서는 차량의 종방향 제어(longitudinal control)만을 고려하기로 한다. 또한 시스템의 단순화를 위해서 피드백 제어에 이용되는 전체 상태값이 직접적으로 측정가능하고, 식 (3)의 시스템 파라미터들은 알려져 있다고 가정한다.

특정한 비선형 시스템에서 피드백 제어입력을 적절히 선정하면 선형의 페루프 시스템을 구성할 수 있다. 이것은 피드백 선형화(feedback linearization) 기법으로 알려져 있다(Isidori, 1989). 다음과 같은 제어입력을 선정한다면 선형화된 시스템을 구할 수 있다.

$$w_i = \frac{1}{a(x_i)} [-b(\dot{x}_i, \ddot{x}_i) + u_i] \quad (4)$$

결과적으로 구해진 선형화된 시스템은 다음과 같으며, 차량의 제어를 위해서는 선형 시스템에서 입력 u_i 를 적절히 선정하기만 하면 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \\ \ddot{x}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i \quad (5)$$

III. 선도차 제어

차량의 위치와 속도에 대한 원하는 값과의 차이를 나타내기 위해 아래와 같이 두 개의 변수를 정의한다.

$$e_i = x_{i-1} - x_i - L_{i-1} - (\lambda_v \dot{x}_i + \lambda_p) \quad (6)$$

$$v_i = \frac{100(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i)}{\dot{x}_i} \quad (7)$$

여기서, L_{i-1} 은 $i-1$ 번째 군집의 길이를 나타낸다. λ_v 는 i 번째 군집의 선도차량이 바람직한 군집간 거리를 이동하는데 걸리는 시간이 되도록 선정하고, λ_p 는 이때에 추가적으로 주어지는 여유거리이다.

차량의 스트링 안정성(string stability)을 보장하기 위해서 단일 제어를 사용하는 것은 부적절한 것으로 알려져 있다(Godbole and Lygeros, 1994; Huang et al, 2000). e_i 와 v_i 의 값의 크기가 작다는 가정하에 설계된 제어기는 e_i 와 v_i 가 큰 값을 가지는 경우에는 시스템 안정화를 위해서 매우 큰 가속 또는 감속을 필요로 한다. 이러한 큰 입력이 엔진의 최대 출력을 초과할 수 있다. e_i 와 v_i 에 값에 따라서 4개의 영역으로 구분하여 각각에 대한 제어를 설계하고, 각 제어기로부터 산출된 4개의 제어입력을 하나로 통합하는 방법이 제안되었다. 각 영역별 제어기는 다음과 같이 정리할 수 있다(Godbole and Lygeros, 1994).

영역 1: $e_i < 0, v_i \geq 0$

$$(-\lambda_p \leq e_i(0) < 0)$$

$$u_{i,1} = c_i \int \hat{e}_i dt + c_p \hat{e}_i + c_v \dot{\hat{e}}_i + k_{11}(\ddot{x}_i - \ddot{x}_i(0)) + k_{12}(\dot{x}_i - \dot{x}_i(0)) \quad (8)$$

$$\hat{e}_i(t) = \begin{cases} e_i & \text{for } t \geq e_i(0)/\eta_p \\ e_i - e_i(0) - \eta_p t & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$(e_i(0) < -\lambda_p)$$

$$u_{i,1} = c_i \int \hat{e}_i dt + \hat{c}_p \hat{e}_i + c_v \dot{\hat{e}}_i + \hat{k}_{11}(\ddot{x}_i - \ddot{x}_i(0)) + \hat{k}_{12}(\dot{x}_i - \dot{x}_i(0)) \quad (10)$$

$$\hat{e}_i = \begin{cases} e_i - \gamma_v \dot{x}_i & \text{for } t \geq \lambda_p/\eta_p \\ e_i - \eta_p t + \lambda_p & \text{for } t \geq \frac{\lambda_p + e_i(0)}{\dot{x}_i(0)\eta_v} \\ e_i & \text{for } t \geq \frac{\lambda_p + e_i(0)}{\dot{x}_i(0)\eta_v} \\ & \text{and } t \geq \lambda_p/\eta_p \\ e_i - \eta_p t + \lambda_p - \gamma_v \dot{x}_i & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$\gamma_v(0) = (\lambda_p + e_i(0))/\dot{x}_i(0) \quad (12)$$

$$\dot{\gamma}_v = -\eta_v \operatorname{sgn}(\gamma_v) \quad (13)$$

$$\hat{c}_p = c_p - \gamma_v c_i \quad (14)$$

$$\hat{k}_{11} = k_{11} + \gamma_v c_v \quad (15)$$

$$\hat{k}_{12} = k_{12} + \gamma_v(c_p - \lambda_v c_i - \gamma_v c_i) \quad (16)$$

영역 2: $e_i > 0, v_i > 0$

$$u_{i,2} = k_{21}\ddot{x}_i + k_{22}(\dot{x}_i - \dot{x}_i(0^-)) + k_{23}(x_i - x_i(0^-) - \int \dot{x}_i(0^-) dt) \quad (17)$$

영역 3: $e_i < 0, v_i < 0$

$$u_{i,3} = k_{31}\ddot{x}_i + k_{32}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) - k_{33}e_i \quad (18)$$

영역 4: 센서 탐지 영역 내에 차량 부재

$$u_{i,4} = k_{41}\ddot{x}_i + k_{42}(\dot{x}_i - \dot{x}_d) + k_{43}(x_i - x_d) \quad (19)$$

여기서, x_d 와 \dot{x}_d 는 링크 레이어에서 공급되는 차량의 바람직한 차간거리와 속도를 각각 나타낸다.

차량의 순항을 위한 제어입력은 4개의 영역에서 구해진 입력을 다음과 같이 통합함으로써 산출된다.

$$u_{i,c} = \sum_{j=1}^4 g_j u_{i,j}, \quad \text{for } \sum_j g_j = 1 \quad (20)$$

차량의 병합(merge)과 분리(split)를 위한 제어입력은 다음과 같이 계산된다.

$$u_{i,m} = x_d^{(3)} + k_{51}(\ddot{x}_i - \ddot{x}_d) + k_{52}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1} + \dot{x}_d) + k_{53}(x_i - x_{i-1} - L_{i-1} + x_d) \quad (21)$$

여기서, x_d 는 미리 계산된 차량의 바람직한 기동 궤적을 나타낸다. 이것은 병합을 시도하는 선행군집과의 거리와 차량에서 허용되는 저크와 가속의 범위를 바탕으로 산출된다. 자세한 내용은 Godbole 과 Lygeros(1994)의 결과를 참조하기 바란다.

IV. 최적 시퀀스 결정

도로상의 일정 구간에서 주행하고 있는 N 개의 군집을 고려해 보자. 관제소가 N 개의 군집의 선도차를 원격 제어할 때, 주어진 통신 자원의 한계로 인하여 관제소는 한번의 샘플링 시간에 하나의 선도차에 대한 제어입력만을 갱신시킬 수 있다고 가정하자. 이때, 차량의 제어입력이 갱신되는 순서는 주기적인 통신 시퀀스(commun-ication sequence)를 통하여 지정되며 다음과 같이 정의된다(Rehbinder and Sanfridson, 2000).

$$S_p = \{s = s_1 s_2 \dots | s_k = s_{k+p} \forall k \geq 1\} \quad (22)$$

$$s_k = i, \text{ if vehicle } i \text{ is updated at } t = kT \quad (23)$$

시간 $t = kT$ 에서 i 번째 차량에 가해지는 입력은 다음과 같이 정리 될 수 있다.

$$\bar{u}_{i,k} = \sigma_i(s_k)u_{i,k} + \sigma_i^*(s_k)\xi_{i,k} \quad (24)$$

$$\sigma_i(j) = \begin{cases} 1, & j = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

여기서, $\sigma_i^*(s_k) = 1 - \sigma_i(s_k)$ 이고 $\xi_{i,k}$ 는 가장 최근에 갱신된 제어입력을 이전 시간에서 가져오기 위해서 도입된 추가적인 변수를 나타내며 다음 식을 만족한다.

$$\xi_{i,k} = \sigma_i(s_{k-1})u_{i,k-1} + \sigma_i^*(s_{k-1})\xi_{i,k-1} \quad (26)$$

$$\xi_{i,0} = 0 \quad (27)$$

(26)과 (27)에 의하여 $\xi_{i,k}$ 의 해는 다음과 같이 구해진다.

$$\xi_{i,k} = \sum_{l=1}^k \left[\sigma_i(s_{k-l}) \prod_{m=1}^{l-1} \sigma_i^*(s_{k-m}) \right] u_{i,k-l} \quad (28)$$

$$= U_{i,k-1} \Sigma_{i,k-1}$$

$$U_{i,k-1} = [u_{i,k-1} \ u_{i,k-2} \ \dots \ u_{i,1}] \quad (29)$$

$$\Sigma_{i,k-1} = \begin{bmatrix} \sigma_i(s_{k-1}) \\ \sigma_i^*(s_{k-1})\sigma_i(s_{k-2}) \\ \sigma_i^*(s_{k-1})\sigma_i^*(s_{k-2})\sigma_i(s_{k-3}) \\ \vdots \\ \sigma_i^*(s_{k-1}) \dots \sigma_i^*(s_2)\sigma_i(s_1) \end{bmatrix} \quad (30)$$

(5)를 이산화한 식에 입력 (23)을 대입하면, 다음과 같은 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{i,k+1} &= A \mathbf{x}_{i,k} + B u_{i,k} \sigma_i(s_k) \\ &\quad + B \xi_{i,k} \sigma_i^*(s_k) \\ &= A \mathbf{x}_{i,k} + [B u_{i,k} \quad B U_{i,k-1}] \\ &\quad \times \begin{bmatrix} \sigma_i(s_k) \\ \Sigma_{i,k-1} \sigma_i^*(s_k) \end{bmatrix} \\ &= A \mathbf{x}_{i,k} + B U_{i,k} \Sigma_{i,k} \end{aligned} \quad (31)$$

여기서, $\mathbf{x}_{i,k} = [x_{i,k} \ \dot{x}_{i,k} \ \ddot{x}_{i,k}]^T$ 이다.

N 개의 군집에서 전체 선도차에 대한 시스템을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = A_a \mathbf{x}_k + B_a U_k \Sigma_k \quad (32)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = [\mathbf{x}_{1,k+1}^T \ \dots \ \mathbf{x}_{N,k+1}^T]^T \in R^{3 \cdot N \times 1} \quad (33)$$

$$A_a = \begin{bmatrix} A & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & A \end{bmatrix} \in R^{3 \cdot N \times 3 \cdot N} \quad (34)$$

$$B_a = \begin{bmatrix} B & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & B \end{bmatrix} \in R^{3N \times N} \quad (35)$$

$$U_k = \begin{bmatrix} U_{1,k} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & U_{N,k} \end{bmatrix} \in R^{N \times kN} \quad (36)$$

$$\Sigma_k = [\Sigma_{1,k}^T \ \Sigma_{2,k}^T \ \dots \ \Sigma_{N,k}^T]^T \in R^{kN \times 1} \quad (37)$$

Σ_k 는 시간 k 에서 각 선도차량에 주어지는 엔진입력을 결정하는 시퀀스 입력이라고 할 수 있으며, 최적의 Σ_p 를 결정하면 최적의 통신 시퀀스를 결정할 수 있다.

대역폭 제한이 없는 환경하에서의 차량 상태값은 위치 n 을 이용하여 나타내기로 한다. 이때, N 대의 차량에 대한 통신 시퀀스가 적용된 상태값과의 차이는 다음과 같다.

$$V_k(\Sigma_k) = \sum_{i=1}^N | \mathbf{x}_{i,k}^n - \mathbf{x}_{i,k} | \quad (38)$$

차량이 기동하는 시간은 허용되는 가속 및 저크에 의해서 결정되며 샘플링 주기 T 에 p 를 곱한 값보다 크다. 따라서 차량의 기동이 $k=1$ 에서 시작하여 $k=m$ 에서 중지한다고 하면 정수 l 에 대하여 $(l-1) \cdot p < m \leq l \cdot p$ 를 만족하는 $l \cdot p$ 가 존재한다. (38)을 이용하여 최적 시퀀스 선정을 위한 가격함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V(\Sigma_{l,p}) = \left(\sum_{k=1}^{l \cdot p} V_k \right)^T Q \left(\sum_{k=1}^{l \cdot p} V_k \right) \quad (39)$$

여기서, Q 는 가중행렬이며 차량의 안전주행을 위해서는 위치 차이에 가중을 두어야 할 필요가 있다.

문제를 단순화시키기 위해 한 대에 차량에 대해서만 균일하지 않은 입력 갱신이 이루어진다고 가정한다. 일반적인 차량간 통신의 프로토콜(protocol)에서 한 대의 차량이 기동을 완료할 때까지는 다른 차량은 기동을 시작하지 않으므로 이러한 가정은 타당할 수 있다. 결론적으로 최적의 시퀀스를 결정하는 문제는 주기적인 시퀀스의 길이 p 를 결정하는 문제로 축소될 수 있다.

p 는 $p \geq N$ 를 만족한다. 이것은 통신 시퀀스의 주기 동안에 각 차량에 적어도 한번은 입력 갱신이 이루어져야 한다는 것을 의미한다. 또한 $p - N$ 은 기동하는 차량에 집중적으로 할당되는 채널을 의미한다. 즉, N 이 6이고 기동하는 차량이 6번째 차량이라고 할 때, $p - N = 2$ 라면 통신 시퀀스는 다음과 같이 정의된다.

$$s = 123456661234566612345666 \dots \quad (40)$$

최종적으로 최적 시퀀스 결정을 위한 문제를 다음과

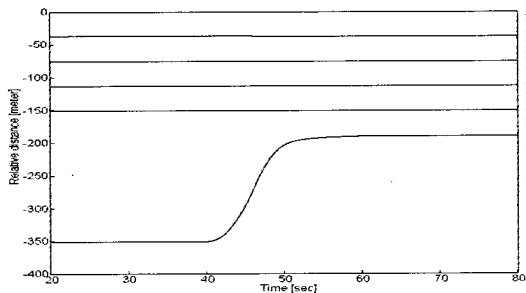
같이 정의할 수 있다.

$$\min_{p-N} V(\Sigma_{l,p}) \quad (41)$$

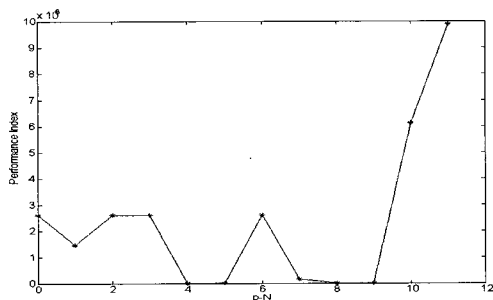
최적의 $p-N$ 은 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있다. 시뮬레이션을 위한 대표적인 설정값은 다음과 같다. 시뮬레이션에서는 모두 6개의 군집이 운행하는 것으로 하였고, 바람직한 속도는 $100m/s$ 이고, 차량의 가능한 저크(jerk)와 가속은 각각 $[-5 \ 5]m/s^3$ 와 $[-5 \ 5]m/s^2$ 에 있도록 하였다. 6번째 군집은 5번째 군집의 최후미와 $153m$ 떨어진 거리에서 출발하고 군집간의 바람직한 안전거리는 약 $40m$ 이다. 1번째 군집에서 5번째 군집까지의 초기 거리는 바람직한 안전거리와 거의 동일하다. 시뮬레이션이 시작하고 일정시간이 지나면 6번째 군집의 선도차는 5번째 군집과의 병합을 시작한다. 균등하지 못한 통신 시퀀스는 군집의 병합이 시작될 때부터 적용된다.

〈그림 1〉은 1번째 군집에 대한 나머지 5개의 군집의 상대거리를 시간에 대해 나타낸 것이다. 병합은 40초에 시작하여 약 60초에 중지한다. 군집의 병합은 차량의 미리 설정된 궤적을 추적하는 형식을 취한다. 그림 1은 대역폭에 대한 제약조건이 없는 경우에 대한 결과로서 효과적인 통신 시퀀스 결정을 통하여 가장 근접하고자 하는 목표가 된다.

위치의 차이에 가중을 주기 위해 $Q = \text{diag}(2, 1, 1)$ 와 같이 가중행렬을 설정할 때, $p-N$ 에 따른 가격의 변화는 그림 2에 나타내었다. 계산된 결과를 통하여 최적의 통신 시퀀스는 주어진 가격함수에서 $p-N=5$ 로 판정할 수 있다.



〈그림 1〉 군집간의 상대거리



〈그림 2〉 $p-N$ 에 대한 $V(\Sigma_{l,p})$

V. 결론

본 논문에서는 다수 군집의 선도차를 효과적으로 원격 제어하기 위해서 필요한 방법을 고찰하였다. 차량과 원격 관제소의 통신에는 현실적으로 대역폭의 한계가 존재하는데, 입력의 급격한 변동이 발생하는 차량에 통신 채널을 추가적으로 할당함으로써 전체 시스템을 효율적으로 운영할 수 있다. 채널의 할당은 통신 시퀀스를 통하여 이루어지며, 본 논문에서는 상태값의 변동에 기반한 가격함수를 설정하여 최적의 통신 시퀀스를 도출하였다. 가격함수를 만족하는 최적의 시퀀스는 시뮬레이션을 통하여 선정되었으며 앞으로 이를 실시간으로 구하는 연구가 추가로 필요하다.

참고문헌

1. D. N. Godbole, and J. Lygeros, "Longitudinal control of the lead car of a platoon," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 43, No. 4, pp. 1125-1135, 1994.
2. S. Huang, W. Ren, and S. C. Chan, "Design and performance evaluation of mixed manual and automated control traffic," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, Vol. 30, No. 6, pp. 661-673, 2000.
3. A. Isidori, *Nonlinear control systems*, New York: Springer-Verlag, 1989.
4. B. Lincoln, and A. Rantzer, "Optimizing linear system switching," *Proceedings of the Conference on Decision and Control*, pp. 2063-2068, 2001.
5. H. Rehbinder, and M. Sanfridson, "Scheduling of a limited communication channel for optimal control," *Proceedings of the Conference on Decision and Control*, pp. 1011-1016, 2000.
6. S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, "Combined longitudinal and lateral control of a platoon of vehicles," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1763-1767, 1992.
7. S. Sheikholeslam, and C. A. Desoer, "Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study," *IEEE Transaction on Vehicle Technology*, Vol. 42, No. 4, pp. 546-554, 1993.
8. P. Varaiya, "Smart cars on smart roads: Problems of control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38, No. 1, pp. 195-207, 1993.