

초고속자기부상열차 절대위치검지시스템 인식구조 설계 및 분석

The Design and Analysis of Recognition Structure for Absolute Train Positioning System of High-speed Maglev Train System

신경호[†] · 신덕호¹ · 이재호¹ · 이강미¹

Kyung-Ho Shin · Ducko Shin · Jae-Ho Lee · Kang-Mi Lee

Abstract For the train positioning system currently applied in high-speed MAGLEV train systems, it is classified into absolute positioning systems which discontinuously detect train positions, and relative positioning systems which continuously detect train positions. In this paper we analyze the configuration model and the numerical model of the absolute positioning system applied in TRANSRAPID which is a representative high-speed MAGLEV train, and design the two configuration models specific to the recognition structures of absolute positioning systems. We also verify the compatibility of the design models of absolute positioning system through simulation using MATLAB and propose the optimal configuration model of absolute positioning systems for high-speed MAGLEV train system.

Keywords : Highspeed Maglev, Absolute Positioning, Recognition Structure, Simulation

초 록 현재 초고속 자기부상열차시스템에 적용하고 있는 위치검지기술은 불연속적으로 열차위치를 파악하는 절대위치검지기술과 연속적으로 열차의 위치를 파악하는 상대위치검지기술로 구분된다. 본 논문에서는 대표적인 초고속자기부상열차인 독일 Transrapid에 적용된 절대위치검지장치의 구조와 수치모델을 분석하고, Transrapid에 적용된 절대위치검지장치와 유사한 구조를 가지는 절대위치검지장치의 인식구조별 모델을 설계하고 시물레이션을 통해 설계한 모델의 적합성을 검증하고 최적의 절대위치검지장치 구조를 제안한다.

주요어 : 초고속 자기부상열차, 절대위치, 인식구조, 시물레이션

1. 서 론

자기부상열차는 열차가 선로를 부상하여 운행하기 때문에 기존 차륜철도방식에서 적용중인 궤도회로, 타코미터 등의 열차위치, 속도검지장치의 적용이 불가능하므로 새로운 방식의 열차위치 및 속도검지 장치의 적용이 필요하다[6]. 현재 자기부상열차시스템에 적용하고 있는 다양한 위치검지기술은 크게 불연속적으로 열차위치를 파악하는 절대위치검지기술과 연속적으로 열차위치를 파악하는 상대위치검지기술로 구분되며, 대부분의 자기부상열차시스템에서는 절대 위치검지기술과 상대위치검지기술을 통합하여 적용하고 있다[1,2].

여기서 절대위치정보는 상대위치정보에 의해 누적된 위치 오차를 보정하고, 열차방호를 위한 바이탈한 정보로 사용되는 안전필수의 중요정보이다[1]. 본 논문에서는 대표적인 초고속자기부상열차인 독일 Transrapid에 적용된 절대위치검지기술의 수치모델을 해석하고, Transrapid에 적용된 절대위치검지장치와 유사한 구조를 가지는 절대위치검지장치의 구조 모델을 설계하고 시물레이션하여 설계한 구조의 적합성을 검증하고 최적의 절대위치검지장치 구조를 제안한다.

2. 초고속자기부상열차 위치검지기술

Transrapid는 지상 1차축 LSM(Linear Synchronous Motor) 추진방식이 적용된 독일의 초고속자기부상열차시스템으로 현재 중국 상하이에 약 30km 길이의 상용화 노선이 구축되어 운영 중에 있다. Transrapid는 상전도 흡인방식의 부상시스템이 적용되었으며, HMB2모형을 시작으로 TR05, TR06, TR07, TR08, TR09의 순서로 다양한 모델의 차량이 개발되어왔다[3]. TR06 및 TR07에 적용된 위치검지장치로는 INPO와 INKREFA가 있다. INPO는 일본의 초고속자기부상 열차 시스템인 MLU에 적용된 위치검지방식과 유사한 교차유도선에 의한 열차 검지방식으로 선로에 교차유도 루프를 설치하여 지상에서 연속적으로 열차의 위치를 검지하는 시스템으로 지상추진제어장치와 직접적으로 인터페이스 되어있다. INPO의 위치 정밀도는 $\pm 8^{\circ}$ (12mm) 수준이다[1]. 하지만 INPO는 정밀한 위치검지를 위해 모든 선로에 교차유도선의 정교한 설치가 요구되어 설치와 유지보수에 많은 비용이 발생하는 문제로 인해 상하이 상용노선의 열차모델인 TR08과 최신 모델인 TR09에서는 INPO와 같은 지상위치검지방식을 적용하지 않고 있으며 INPO를 대신하여 차량에서 지상선로의 stator 톱니개수를 측정하여 열차위치를 검지하는 새로운 차상기반의 상대위치검지장치가 적용되었다[3]. Transrapid에 적용된 또 하나의 위치검지장치인 INKREFA는 불연속으로

[†]교신저자 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구실
E-mail : khshin@krrri.re.kr

¹한국철도기술연구원 열차제어통신연구실

열차위치를 정밀하게 검지하는 절대 위치검지장치로서 일정한 간격으로 선로하단에 특정한 비트정보가 각인된 LRL (Location Reference Lug)을 설치하고, 열차가 LRL을 통과할 때 열차에 설치된 센서가 LRL 비트정보를 판독하는 방식으로 열차위치의 확인이 가능하다.

차량센서는 차량의 전두부에 총 4개가 설치되는 여분구조를 가지며, 1개 LRL은 4bit정보를 포함하고 있어, 복수의 LRL을 그룹화하여 사용하면 기준위치정보의 확장이 가능하다[1]. INKREFA를 통해 얻어진 위치정보는 열차번호 및 열차위치 보정을 위해 이용된다. 따라서 열차에서 직접 측정된 절대 및 상대 열차위치정보는 38GHz 무선통신을 통해 지상제어설비에 전달되어 추진제어 및 운영제어를 위해 사용된다[3].

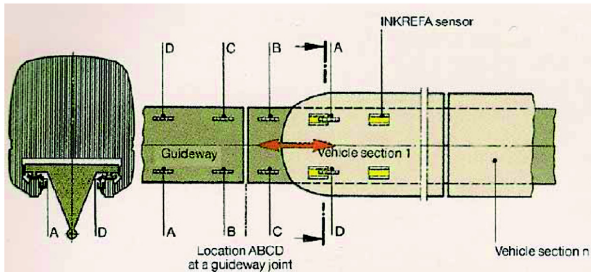
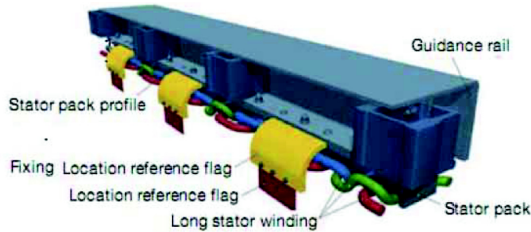


Fig. 1 Transrapid INKREFA absolute positioning system

3. 초고속자기부상열차 절대위치검지기술 분석

3.1 Transrapid 절대위치검지시스템 검지원리

Transrapid에 적용중인 절대위치검지시스템인 INKREFA에 대한 상세 사양은 알 수 없지만 앞서 분석된 INKREFA의 동작원리를 통해 절대위치검지시스템의 구조 분석이 가능하다. 아래의 Fig. 2는 INKREFA를 구성하는 LRL과 차량 센서의 구조를 나타낸다. LRL은 고유의 특정 비트정보를 표현하기 위하여 전도성 물질이 비트정보에 따라 각인되어 있는 구조를 가진다. 아래 Fig. 2에서 보는 바와 같이 LRL에 도전체인 구리를 입히고 여기에 비트코드를 표시하는 슬롯(slot)을 에칭(etching)한 구조로 되어있다. 즉 에칭된 슬롯의 위치에 따라 “0” 또는 “1”의 이진코드로 해석되며, 기준 위치의 좌측에 슬롯이 존재하면 bit는 “1”이 되며, 우측에 슬롯이 존재하면 bit는 “0”으로 해석된다. 차량센서는 송신 및 수신코일 10쌍으로 구성된 U형 구조를 가지며, 송수신코일 모두 공통적으로 중심부 2개의 코일과 외곽부 8개의 코일이 서로 상이한 형상으로 되어져 있다[1]. 중심부 코일과 외

곽부 코일의 역할은 정확하게 확인되어 있지 못한 상태이며, 각 코일구성부의 역할에 따라 절대위치표지판의 인식방식이 서로 상이하므로 일괄인식 또는 연속적인 순차인식의 형태로 해석할 수 있다.

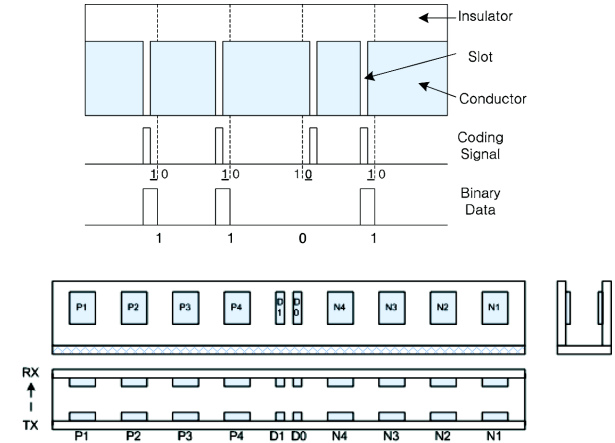


Fig. 2 The Layout of LRL and vehicle sensor coils

3.2 수치모델 분석

U형 센서의 송신코일과 수신코일은 서로 마주보고 있는 각 코일과 한 쌍을 이루게 되며, 송신코일로부터 방사된 고주파 신호는 수신코일에 자기장을 일으키게 되고, 전자기유도원리에 의해서 수신코일에는 유도 전압이 발생한다. 하지만 송신코일과 수신코일 사이에 LRL이 존재하게 되면 수신코일에 발생된 자기장이 변하여 유도전압의 크기도 변하게 된다. 이러한 전자기 유도원리는 수신코일의 한 지점에서 유도된 자기장의 크기를 계산하는 비오사바르의 법칙(Biot-Savart's Law)으로 표현이 가능하며 아래의 Fig. 3과 같이 송신코일과 수신코일의 구조적인 관계가 성립하면 z축을 따라 유도되는 자기력은 송신코일에서의 자기력의 합으로 계산이 가능하다[4].

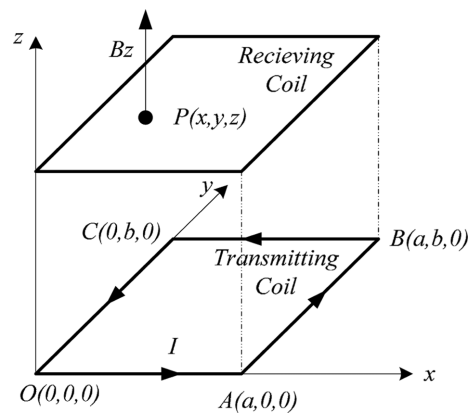


Fig. 3 The relation between transmitting and receiving coils

송신코일에 의한 수신코일상의 임의의 위치 $P(x,y,z)$ 에서 유도되는 자기력은 아래의 식(1)과 같이 송신코일의 각 변

(OA, AB, BC, CO)에 의해 유도되는 자기력의 합으로 표현된다.

$$B_z = B_{OA} + B_{AB} + B_{BC} + B_{CO} \quad (1)$$

$$B_{OA} = \frac{\mu_0 I y}{(4\pi(y^2 + z^2))} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{(a-x)}{\sqrt{(a-x)^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (2)$$

$$B_{AB} = \frac{\mu_0 I (a-x)}{(4\pi((a-x)^2 + z^2))} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{(a-x)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{(b-y)}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} \right) \quad (3)$$

$$B_{BC} = \frac{\mu_0 I (b-y)}{(4\pi((b-y)^2 + z^2))} \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + (b-y)^2 + z^2}} + \frac{(a-x)}{\sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2 + z^2}} \right) \quad (4)$$

$$B_{CO} = \frac{\mu_0 I x}{(4\pi(x^2 + z^2))} \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{(b-y)}{\sqrt{x^2 + (b-y)^2 + z^2}} \right) \quad (5)$$

여기서, B_{OA} , B_{AB} , B_{BC} , B_{CO} 는 각각 z 축을 따라 OA , AB , BC , CO 성분에 의해 유도된 자기장을 나타내며 a , b 는 OA , AB , BC , CO 의 폭을, I 는 송신코일에 인가되는 전류의 크기를 나타낸다. 또한 μ 는 자유공간의 투자율(permeability of free space)을 나타내며, $4\pi \times 10^{-7}$ (T.m/A)의 값을 가진다. 이때 $I = 2A$, $a = 50mm$, $b = 50mm$, $z = 50mm$ 라고 가정하면, 아래 Fig. 4와 같이 수신코일에서의 유도된 자기장의 분포도를 얻을 수 있다.

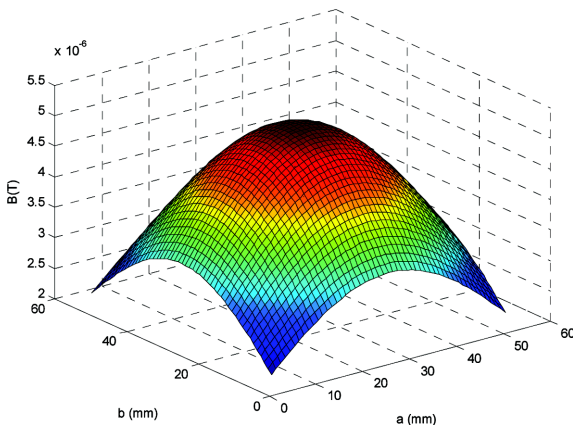


Fig. 4 The Magnetic inductions in receiving coil

Table 1 The electromagnetic induction characteristic for coils dimensions and gaps

a, b	50mm	50mm	50mm	100mm	25mm
z	50mm	100mm	25mm	50mm	50mm
Magnetic Field	$B = 5.23 \times 10^{-6}$ T(Max)	$B = 0.89 \times 10^{-6}$ T(Max)	$B = 18.48 \times 10^{-6}$ T(Max)	$B = 9.23 \times 10^{-6}$ T(Max)	$B = 1.77 \times 10^{-6}$ T(Max)
Characteristic	Ref	Coils Gap ↑ Magnetic Field ↓	Coils Gap ↓ Magnetic Field ↑	Coils Dimension ↑ Magnetic Field ↑	Coils Dimension ↓ Magnetic Field ↓

상기 식(1)에 따라 유도된 자기장은 송수신 코일의 크기와 코일간의 간격에 따라 상이한 특성을 가지며, 아래 Table 1은 송수신 코일의 크기변화 및 송수신 코일간의 간격변화에 따라 발생하는 유도 자기장의 특징을 보여준다. 시뮬레이션 결과와 같이 송수신 코일의 크기가 크면 클수록 유도 자기장의 크기가 커지는 특징을 보이며, 크기가 작을수록 유도 자기장의 크기가 작아지는 특징을 보인다. 또한 송수신코일간의 간격이 커질수록 유도자기장의 크기는 작아지며, 간격이 작을수록 유도자기장의 크기가 증가하는 특징을 보인다. 따라서 고속 이동환경에서도 안정적인 유도자기장을 얻기 위해서는 송수신코일의 크기를 증대시키고, 송수신코일과 수신코일간의 간격을 조밀하게 설계할 필요가 있다.

3.3 절대위치검지장치 구조분석

INKREFA 센서는 U형의 구조로 크기가 다른 2가지 종류의 총 10개의 송신 및 수신부 채널 쌍으로 구성되어있기 때문에 U형센서 내 2종류의 송수신 채널의 역할에 따라 일괄 인식방식과 순차인식방식으로 해석할 수 있다[5,6]. 일괄인식방식은 Fig. 5의 좌측과 같은 인식구조를 가진다. 즉, P1~P4의 4개 센서채널은 비트정보확인용으로 D0 채널은 비트정보확인신호 동기용으로 사용되는 방식으로 D0 채널이 도전성 물질을 만나 수신신호 값이 0이 되었을 때 P1~P4 채널을 동시에 읽어 들여 LRL 비트정보를 판독하는 방식이다.

순차인식방식은 Fig. 5의 우측과 같은 인식구조를 가지며 N1~N4의 4개 센서채널을 신호동기용으로, D1이 비트정보를 판독하는 센서채널로 이용된다. 따라서 N4, N3, N2, N1의 순서로 각 센서채널이 LRL의 도전성 물질을 만나 수신신호 값이 임계값에 도달했을 때 비트정보 판독용 동기신호를 발생하면, D1 채널이 순차적으로 1비트씩 LRL 비트정보를 인식하여 절대위치를 판독하게 된다.

4. 인식구조 시뮬레이션 모델 설계 및 검증

4.1 신호발생기 설계

신호발생기는 LRL과 송수신코일간의 상호관계를 통해 U형 센서에서 계측되는 신호를 모사하는 역할을 한다. 본 논문에서는 신호발생기 설계를 위해 LRL구조와 센서구조를 아래 Fig. 6과 같이 단순화하여 적용한다. LRL은 총 4bit의 코드정보를 포함하며, 각 기준선간격이 0.2m씩 떨어져 있으며, 총 1m 길이의 구조를 갖는다. 센서모델은 5채널의 각 센서코일이 기준선 간격과 동일한 간격으로 배치되도록 가정하였다. Fig. 6의 LRL은 1101 비트코드의 설정 예를 나타낸다.

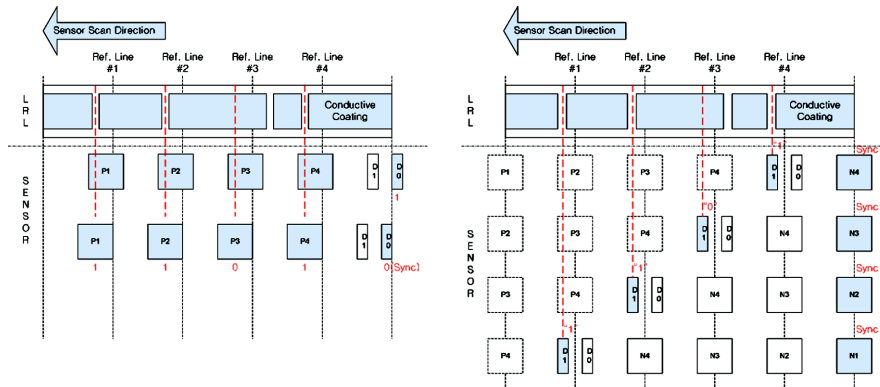


Fig. 5 The comparison for recognition methods(one-shot vs. sequential)

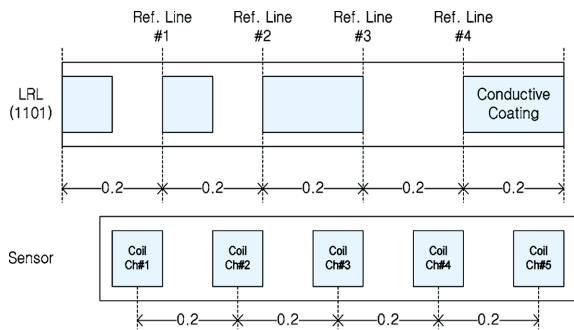


Fig. 6 The structures of LRL and sensor coils for signal generator simulation

본 시뮬레이션에서 구현한 신호발생기는 열차의 이동 속도, 비트코드와 채널 및 LRL의 구조(채널별 간격)를 입력변수로 하여 다양한 이동환경 및 비트코드에 대한 신호출력이 가능하도록 구현하였다. 아래의 Fig. 7은 “1101” 비트값을 가지는 LRL의 우측방향으로부터 좌측 방향으로 100m/s의 속도로 센서가 이동할 경우에 대한 각 센서 채널 별 출력신호를 나타낸다.

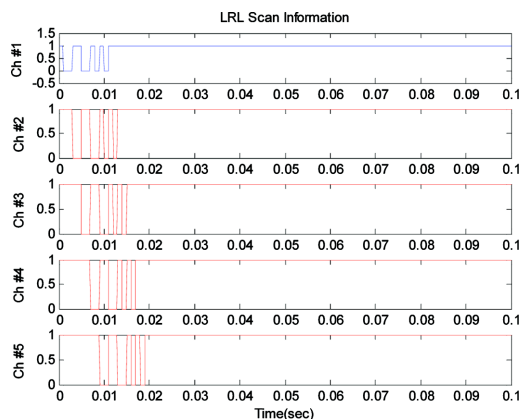


Fig. 7 The output of signal generator simulation

4.2 인식구조별 신호처리모델 설계

4.2.1 일괄인식방식의 신호처리모델 설계 및 검증

신호발생기로부터 생성된 특정 비트코드의 출력신호로부터

비트코드를 판독하기 위해서는 신호처리회로가 필요하며, 일괄인식방식과 순차인식방식의 2가지 방식으로 구성이 가능하다. 일괄인식방식은 4개의 센서 채널을 각 비트정보인식용으로 나머지 1개 센서채널을 비트정보인식을 위한 신호동기용으로 사용하는 방식이다. 일괄인식방식에서는 앞에서 정의된 5채널의 U형 센서구조에서 비트정보인식용 채널로 Ch1 ~ Ch4를 설정하고 신호동기용 채널로 Ch5를 설정한다. 따라서 신호 동기용 채널에서 동기신호가 측정되는 순간 4개의 비트정보인식용 채널에서 각 채널별로 해당 비트정보를 인식하여 LRL의 비트코드를 판독한다. 일괄인식방식의 신호처리 구조의 모델링을 위하여 수치연산 소프트웨어인 Matlab Simulink를 이용하였으며, 구현된 일괄인식구조모델은 아래의 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 Sensor_Ch_Bit는 각 채널별 LRL비트정보 인식로직으로 Ch5로부터 동기신호 입력이 확인되면 Ch1~Ch4의 비트정보를 인식하며, 판독된 LRL 비트코드는 LRL_Bit_Code 창에 표출된다.

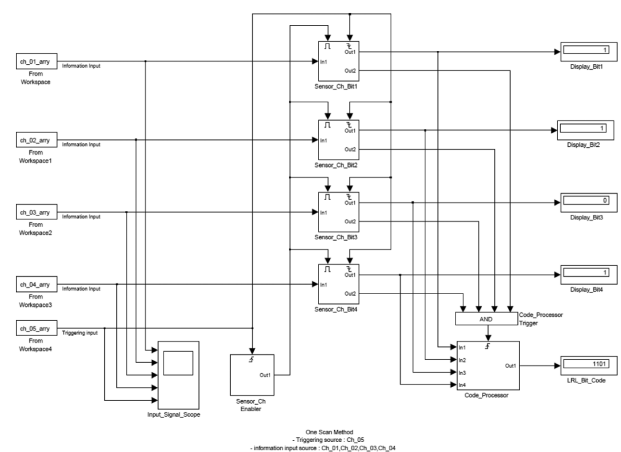


Fig. 8 The design structure for one-shot recognition

일괄인식 구조모델에 대한 검증은 Fig. 7의 신호발생기를 사용하여 검증이 가능하다. 즉, 입력된 LRL 비트코드와 일괄인식구조를 통해 판독된 비트코드가 동일함을 확인하는 방법으로 검증이 가능하며, 본 논문에서는 Matlab 시뮬레이션

을 통해 LRL 비트코드의 입력값(1101)과 판독된 값(1101)이 동일함을 확인하여 검증하였다.

4.2.2 순차인식방식의 신호처리 시뮬레이션 모델

앞서 정의된 일괄인식방식과 달리, 순차인식방식은 Ch1을 비트정보인식용으로 사용하며, 나머지 4개의 센서채널인 Ch2~Ch5을 비트정보 인식을 위한 신호 동기용으로 사용하는 방식이다. 즉, 순차인식방식에서는 Ch1로부터 입력되는 비트코드 신호를 Ch2~Ch5에서 순차적으로 얻어진 4개의 동기신호에 맞추어 LRL 비트정보를 판독한다. 순차인식 구조 모델은 Fig. 9와 같이 Matlab Simulink로 모델링 하였으며, 여기서 입력채널 Ch1은 비트정보인식로직인 Sensor_Ch_Bit1 ~ Sensor_Ch_Bit4의 입력신호로 동시에 전송되어 각 비트 별 정보가 인식되며, Ch2~Ch5의 신호입력은 비트정보인식 로직에 대한 각각의 동기신호로 이용되는 구조를 가진다.

순차인식 구조모델에 대한 검증은 일괄인식구조 모델의 검증방법과 동일한 방법으로 검증하였으며, LRL 비트코드의 입력값(1101)과 판독된 값(1101)이 동일함을 확인하였다. 하지만 순차인식방식은 일괄인식 방식과 비교하여 인식로직 Sensor_Ch_Bit1 ~ Sensor_Ch_Bit4의 인식동작을 순차적으로 제어하기 위하여 4개의 Enabler(Sensor_Ch_Bit_En)가 추가로 필요하고, 순차적인 비트정보의 인식과 동시에 기존에 인식한 비트정보의 저장에 부가적으로 처리되어야 함으로 논리회로의 복잡성이 증가하는 단점이 확인되었다.

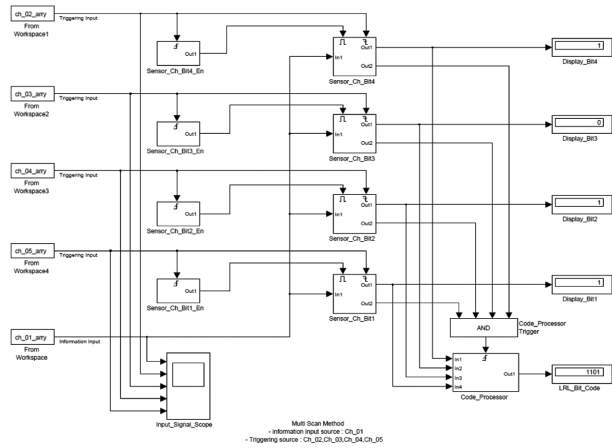


Fig. 9 The design structure for sequential recognition

5. 결 론

초고속자기부상열차에서 절대위치검지정보는 열차 운행에 따라 누적된 열차위치 오차를 보정하고, 열차방호를 위해 반드시 필요한 안전필수 정보이다. 본 논문에서는 초고속자기부상열차인 transrapid에 적용중인 절대위치 검지기술의 검지원리와 수치모델을 분석하여 위치검지 성능 개선을 위한

LRL과 센서간의 구조 관계를 해석하였다. 또한 transrapid에 적용된 절대위치검지장치와 유사한 구조를 가지는 절대위치검지장치의 일괄인식 구조모델과 순차인식 구조모델을 설계하고, 시뮬레이션하여 설계한 2가지 구조모델의 적합성을 확인하였다.

일괄인식방식은 하나의 센서채널을 비트코드 정보인식을 위한 동기 신호용으로 사용하는 방식으로 비교적 단순한 신호처리구조로 구현이 가능한 장점이 있다. 순차인식방식은 하나의 센서채널을 비트코드 정보인식용으로 사용하고 나머지 4개의 센서채널을 정보인식을 위한 동기신호용으로 사용하는 방식으로 일괄인식방식에 비해 다소 복잡한 구조를 가진다. 따라서 400km/h 이상의 초고속으로 운행되는 초고속 자기부상열차에서 더욱 정밀한 절대위치검지를 위해서는 초고속자기부상열차가 절대위치검지점들을 통과할 때 신속한 신호처리가 필수적이므로 단순한 신호처리구조를 가지는 일괄인식 구조모델의 적용이 적합하다. 또한 일괄인식 구조모델에서 더욱 정밀한 절대위치검지를 위해서는 동기신호의 타이밍이 매우 중요한 요소이므로 동기신호용 센서채널의 코일 폭을 좁게 설계하여 동기신호의 타이밍 정확성을 향상시킬 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부 기술료사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. Heinrich (1989) *Transrapid Maglev System*, Hestra-Verlag, pp. 69-70.
- [2] Kazumasa Morishita (2006) Novel train position detecting system in the Yamanashi Maglev Test Line, *Maglev2006*.
- [3] X.-M. Wu (2003) *Maglev Train*, Shanghai Science and Technology Press, China.
- [4] David K. Cheng (1993) *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley, pp. 180-186.
- [5] K.H. Shin (2009) Study on the Principle of Absolute Train Positioning System for Ultra High Speed Maglev Train, *KIEE EMECS 2009*, pp. 157-159.
- [6] K.H Shin (2009) The Simulation Model Design of Absolute Train Positioning System for High Speed Maglev Train System, *2009 Autumn Conference of The Korean Society for Railway*, pp. 135.
- [7] H.S. Yoon (2005) Estimation of Train Position Using Sensor Fusion Technique, *Journal of the Korean Society for Railway*, 8(2), pp. 155-160.

접수일(2010년 10월 7일), 게재확정일(2011년 2월 28일)