

자기부상열차의 최적 자기 차폐 (Optimized Magnetic Shielding for the MagLev Vehicles.)

尹賢普* · 朴贊一** · 朴喜昌** · 孫永洙** · 林桂在*
(Hyun Bo YOON, Chan Il PARK, Hee Chang PARK,
Young Soo SON, Gye Jae LIM)

要 約

자기부상열차 시스템에서의 자속 누설은 주로 부상용 전자석과 리니어 모터, 안내용 전자석으로 부터 발생하여 intra-system 및 inter-system EMI 현상과 biological effect을 야기할 수 있다.

본 논문에서는 누설 자속의 크기에 영향을 주는 각종 요소들을 고려하여 열차 주위에 분포하는 자기장의 세기를 계산하였으며, 여기서 얻어진 결과를 이용하여 차체 바닥과 측면에 사용되는 구조물의 재질과 위치에 따른 최소 두께를 계산하여 자기장 차폐를 위해 차체 무게가 증대되는 것을 최소로 할 수 있는 방법을 제시하였다.

이 결과를 한국해사기술연구소에서 설계제작한 2인승 자기부상열차 모형에 적용하여 열차 모형 주위의 자속 밀도에 대한 등자위선을 구하고, 이때의 최소 차폐 두께를 제시함으로써 차폐 재료의 무게에 대해 50% 이상의 감량이 가능하였다.

ABSTRACT

Magnetic leakage flux which is generated from the levitation magnets, linear induction motors, and guide magnets of a MagLev(Magnetic Levitation) system is directly related to inter-system EMI, intra-system EMI, and biological effects.

In this paper, the magnetic leakage flux from MagLev vehicles designed by Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering was calculated considering the various parameters which influence magnetic field intensity around the MagLev system.

Based on the calculated field intensity, the thickness of shielding material and shielding position for MagLev floor and side walls are calculated, taking into account the shielding effectiveness of a shield with minimum weight.

For the nonuniform shielding method derived from the above procedure, the weight of a shield consisting of floor and side walls shielding can be reduced to more 50% than uniform shielding method.

I. 서 론

* 正會員, 東國大學校 電子工學科

(Detp. of Electronic Eng., Dong Guk Univ.)

** 正會員, 韓國海事技術研究所

(Korea Research Institute of Ships & Ocean Eng.)

미래의 새로운 대중교통 시스템으로써 자기부상 열차 시스템이 실현되는 경우에는 넓은 지역에 걸쳐 건설되고 또한 대중의 일상생활과 밀접해지기 때문

에 설계시의 대책 부족으로 인해 여러가지 문제가 발생할 수 있다.

특히 전기·전자 기기 및 시스템이 사회 각 분야에 보급됨에 따라 필연적으로 불요전자파의 발생이 증가하여 자체 시스템 및 타 시스템에 장애를 유발시키며, 인체에 장애를 일으키는 EMI 문제점들이 나타나고 있다.

외국의 연구 결과로써 자기부상열차가 건설되면 시스템 내의 intra-system EMI와 전자 시스템에 강력한 잡음을 발생시키는 inter-system EMI를 초래할 수 있으며 강한 자기장 형성으로 인체에의 영향도 무시할 수 없는 것으로 나타나 시스템 실현 시 intra-system EMI와 inter-system EMI를 초래하는 누설 자속의 분포에 대한 예측 시뮬레이션 및 누설 자속을 효과적으로 차폐시킬 수 있는 차폐 방법에 대한 연구가 기본적으로 수행되고 있다[1].

자기부상열차 시스템에서의 자속 누설은 주로 부상용 전자석(Levitation Magnet : LM)과 리니어 모터(Linear Induction Motor : LIM), 안내용 전자석(Guide Magnet : GM)으로 부터 발생한다.

또한 누설 자속의 세기는 시스템의 부하와 속도, 가속도에 따른 제어신호에 영향을 받으며, 자체의 구조와 전자석의 위치에 따라라도 영향을 받는다.

본 논문에서는 누설자속의 크기에 영향을 주는 이러한 요소들을 고려하여 시스템 내의 자속 분포를 Biot-Savart의 법칙으로 계산하였으며, 여기서 얻어진 결과를 이용하여 차체 바닥과 측면에 사용되는 구조물의 재질과 위치에 따른 최소 두께를 계산하여 자기장 차폐를 위해 차체 무게가 증대되는 것을 최소로 할 수 있는 방법을 제시하였다.

시뮬레이션의 타당성을 확인하기 위해 독일, 일본, 캐나다에서 설계제작된[1-4] 자기부상열차에 적용하여 잘 일치함을 확인한 후, 한국해사기술연구소에서 설계제작한 2인승 자기부상열차 모형에 적용하여 열차 모형 주위의 자속밀도에 대한 등자위선을 구하고, 이때의 최소 차폐 두께를 계산하였다.

여기서 얻어진 결과는 부상용 전자석과 리니어 모터에 인가되는 전류의 파형에 따라 교류성분의 변동자계 만이 주로 존재하였으며, 그 최대 피크값은 열차 모형의 탑승바닥에서 약 40[Gauss]정도, 열차 모형에서 1m거리에서 약 4[Gauss] 정도가 계산되었다.

이 값은 변동자계에 대한 외국의 규제값[5-8]을 매우 크게 상회하는 값으로 적절한 차폐 방법이 필

요함을 알 수 있었다.

이때문에 변동자계의 값이 외국의 규제값들 중에서 최소값인 0.15 [Gauss] 이하로 차폐하도록 하기 위한 차폐재료에 따른 최소의 차폐두께를 제시하였다.

II. 누설 자속의 해석

Biot-Savart의 법칙의 일반식은 미소체적 dV 상의 전류 밀도 벡터가 \vec{J} 일때 이 미소체적 dV로 부터 거리 벡터 \vec{r} 떨어진 곳의 자속 밀도 벡터 \vec{B} 는 다음과 같이 구해진다[9].

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \nabla \times \vec{A} \\ &= \nabla \times \frac{\mu}{4\pi} \iiint \vec{J} \frac{dV}{r} \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \iiint \nabla \times (\vec{r}^{-1} \vec{J}) dV \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \iiint (\vec{r}^{-1} \nabla \times \vec{J} - \vec{J} \times \nabla \vec{r}^{-1}) dV \\ &= \frac{\mu}{4\pi} \iiint \frac{\vec{J} \times \vec{r}}{r^3} dV \end{aligned} \quad (1)$$

전자석에 감긴 도선의 코일 권선수가 N이고, 여기에 흐르는 전류 \vec{I} 의 신호의 파장에 비해 코일의 두께가 매우 작을 때는 식(1)을 코일의 미소길이 dt로 표현되는 1차원 식으로 근사화할 수 있다.

$$\vec{B} = \frac{\mu \vec{I}}{4\pi} \int \frac{\vec{u}_t \times \vec{r}}{r^3} dt \quad (2)$$

여기서 \vec{u}_t 는 미소길이 dt의 방향단위벡터이다.

위 전분식을 컴퓨터로 계산하기 위해서 전체 코일 길이를 m개의 조각으로 나누어 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \frac{\mu \vec{I}}{4\pi} \sum_{i=1}^m t_i r^{-3} \vec{u}_{t_i} \times \vec{r} \quad (3)$$

여기서 t_i 는 i번째 선로조각의 길이, \vec{u}_{t_i} 는 i번째 선로조각의 방향단위벡터, \vec{r} 는 i번째 선로조각과 측정점 사이의 거리벡터이다.

자기부상열차에 부상용 전자석과 리니어 모터를 그림(1)과 같은 타원 나선 구조로 근사화하여 식(3)을 적용하였다.

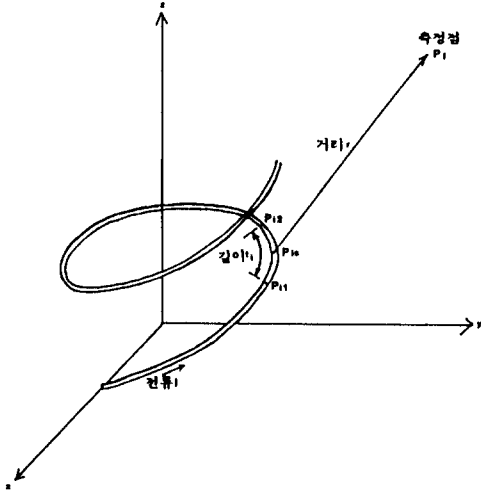


그림 1. 나선형 코일에서의 좌표관계
Fig 1. The Coordinate of a elliptic coil.

개별 전자석 또는 개별 리니어 모터에서 발생하는 누설 자속 밀도 \vec{B} 에 대한 공간 분포 특성은 식(2)와 같이 전자석의 코일 전체 길이에 대한 적분으로 구해지며, 또한 n개의 부상용 전자석과 리니어 모터의 위치가 결정되고 각각의 인가 전류 특성을 알게 되면 자기부상열차 전체 공간 상의 한 점에서의 총 누설자속밀도 \vec{B} 의 분포는 각 전자석의 배열 구조에 따른 벡터 합으로 구해진다.

$$\vec{B}_t = \sum_{k=1}^n \vec{B}_k \quad (4)$$

여기서 k는 부상용 전자석 및 리니어 모터에 대한 일련번호이다.

전체 공간 상에서의 자속 분포는 각 점에서 구해진 자속 밀도의 선을 연결하여 등자위면을 구할 수 있다.

III. 차폐 두께의 설계

자기부상열차 주위의 자속밀도 분포가 구해지면 다음에 최적의 차폐 효과를 갖는 차체의 구조를 설

계하여야 한다.

차폐판에 입사하는 자속선이 모두 수직으로 입사하는 것으로 가정하여 경계조건을 다음 식(5)와 같이 설정한다.

이 가정은 공기와 비포화 강자성 물질 사이의 경계 표면에서의 굴절 법칙에 따라 타당하다(1,4,10).

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_0} = \frac{\mu_1}{\mu_0} \gg 1 \quad (5)$$

여기서 α_0 은 투자율이 μ_0 인 비자성 매질 내에서 법선벡터와 입사 자기장 사이의 각이며, α_1 은 투자율이 μ_1 인 자성 매질 내에서 법선벡터와 입사 자기장 사이의 각이다.

최소의 차폐 두께로 최대의 차폐 효과를 얻기 위한 필요조건은 다음 관계식에 의해 입사 자기장의 공간 분포에 따라 차폐 두께를 각기 다르게 설계하는 것이다.

공간 상의 한점에서 차폐없이 구해진 자속 밀도가 B_c 일때, 이 자속밀도를 효과적으로 차폐하기 위해서 수동차폐 방법을 사용한다면, 투자율이 높은 재료를 사용하는 것이 기본이 된다[4].

수동차폐 방법의 기본 개념은 자유공간에서의 임의의 간격 d_0 내에서의 자속밀도 분포와 두께 d_1 인 자성체 내에서의 자속밀도 분포가 동일하기 위해서는 각각의 투자율이 μ_0 와 μ_1 일 때 다음과 같이 관계가 성립한다.

$$\mu_0 H_0 d_0 = \mu_1 H_w d_1 \quad (6)$$

여기서 H_w 는 자성체가 포화되지 않은 상태에서의 자성체 내를 통과하는 피크 자계이다.

이 자성체가 포화되는 경우에 자성체 내를 통과하는 자계의 포화값을 H_s 라 한다면, $H_w < H_s$ 가 되므로 이때의 자성체 두께 d_1 은

$$d_1 = \frac{\mu_0 H_0}{\mu H_w} d_0 \gg \frac{\mu_0 H_0}{\mu_1 H_s} d_0 = \frac{B_0}{B_s} d_0 \quad (7)$$

가 되고, 최소 두께는 $H_w = H_s$ 일때 주어진다.

이점에서의 최적의 차폐 효과를 얻기 위한 차폐 물질의 두께 d_1 를 구하기 위해서는 다음 식을 사용할 수 있다.

$$\Phi = \int_{L_1}^{L_2} B_z dl = d_l B_n \quad (8)$$

여기서 Φ 는 길이 L_1 부터 L_2 까지에 입사되는 자속선의 수이며,
 B_z 는 차폐점에 수직으로 입사한 자속 밀도,
 L_1 과 L_2 는 차폐판의 끝부위,
 dl 은 차폐판의 증분 길이,
 B_n 는 차폐 물질의 포화 자속밀도 이다.

IV. 차폐 효과

III장에서 구해진 차폐 두께는 최소의 두께로 최적의 차폐 효과를 얻을 수 있는 두께이며, 이 두께에서의 차폐 효과 (Shielding Effectiveness : SE)를 구하면 다음과 같다[11,12].

$$SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB} \quad (9)$$

여기서 A_{dB} 는 흡수손실로 $A_{dB} = 8.686 \alpha t$

R_{dB} 는 반사손실로

$$R_{dB} = 20 \log [(1+K)^2 / 4K]$$

B_{dB} 는 재반사 보정항으로

$$B_{dB} = 20 \log | 1 - [(K-1)^2 / (K+1)^2] \exp(-2\gamma t) |$$

이다.

자기부상열차에서 발생하는 누설자속 분포는 초저주파 또는 직류 자기장에 의해 형성되고 근방계에 대한 차폐 효과를 구하는 문제이므로, 위식은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$t/\delta, K, 2\gamma t \ll 1$ 일 때, 직류를 포함한 초저주파 이하 주파수에서의 SE는

$$SE_{dB} = 20 \log | [1 - (1-4K)(1-2\gamma t)] / 4K | \approx 20 \log | [1 - (1-4K-2\gamma t)] / 4K | \quad (10)$$

만약 $8K\gamma t \ll 4K$ and $2\gamma t$ 이면

$$SE_{dB} \approx 20 \log | 1 + \gamma t / 4K | \quad (11)$$

가 된다. 여기서

$$\gamma = (2\pi f \mu \sigma)^{1/2} \quad (12)$$

이며, K 는 자유공간 특성임피던스와 차폐 재료의 특성임피던스 비로 근방계에서는 자기 소스에 의한 저 임피던스계이므로

$$K = r(2\pi f \sigma \mu_0 / \mu_r)^{1/2} \quad (13)$$

이나, 여기서 r 은 자기 소스와 차폐판과의 거리이다.

V. 2인승 자기부상 열차에 대한 시뮬레이션

1. 자기부상열차의 전자석 배치 구조

한국해사기술연구소에서 시험용으로 제작한 2인승 자기부상열차 모형의 부상용 전자석과 리니어 모

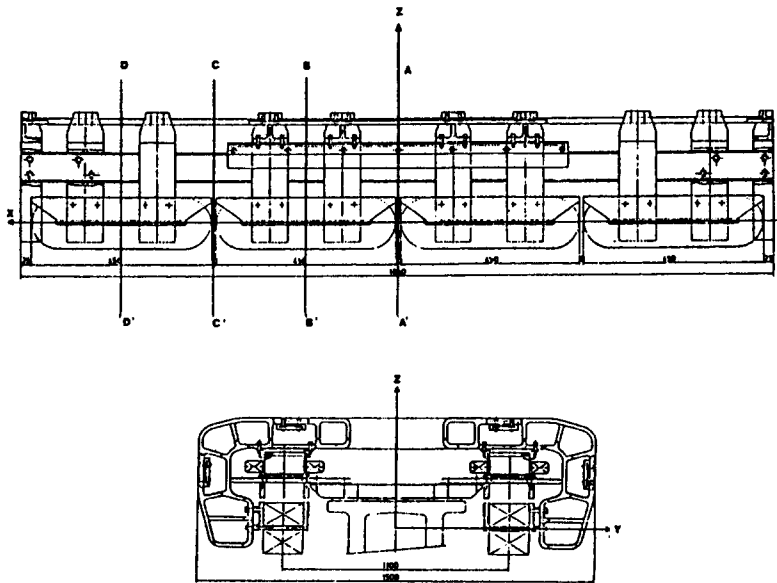
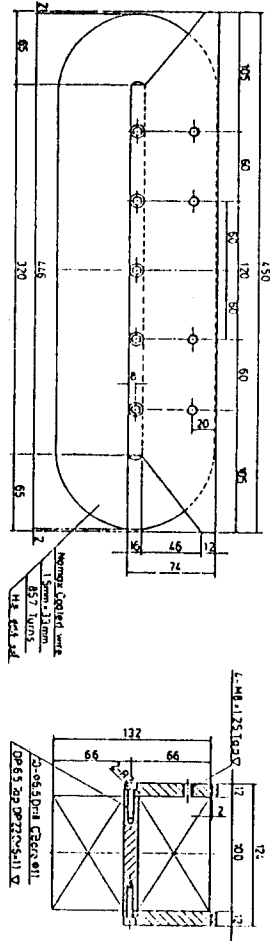


그림 2. 2인승 자기부상열차 모형의 구조

Fig 2. The configuration of a MagLev.



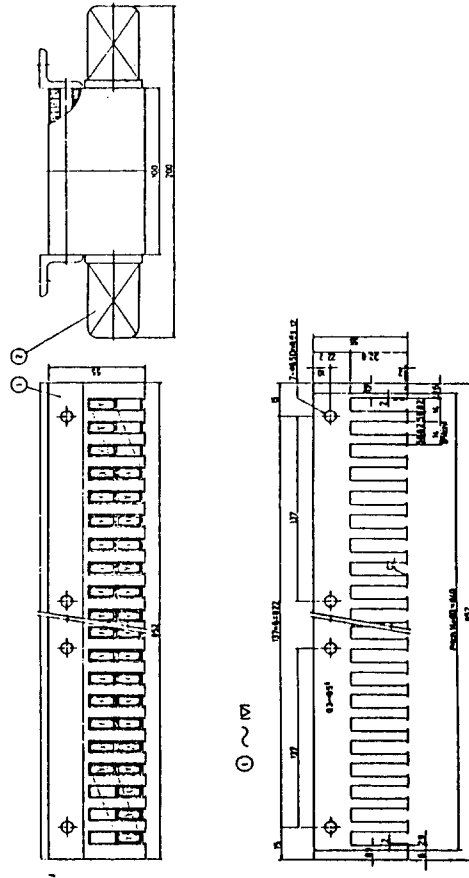
- coil turn 수 : 780 회
- coil의 재질 : Al
- coil의 단면적 : 4.95 mm² 각형
- coil 저항 : 2.95 ohm / 총길이
- 정격전류밀도 : 1.25 A / mm²
- 공극자속밀도 : 0.55 T
- 자성체 Core : SS41

그림 3. 부상용 전자석의 구조

Fig 3. The configuration of a levitation Magnet.

터 구조 및 배치에 따른 자속밀도의 등자위면 분포를 정확성과 컴퓨터 계산 시간을 고려하여 Biot - Savart의 법칙으로 계산하였다.

먼저, 이 열차모형의 설계 구조를 그림(2)에 보였으며, 부상용 전자석과 리니어 모터의 세부구조 및



- coil turn 수 / slot : 20회
- coil의 재질 : Cu
- pole 수 : 6
- MMF / phase : 2450 [A·Turn]
- Slot 수 : 54 + 6
- MMF / Slot : 140 [A·Turn] = 7[A] × 20[Turn]
- 자성체 Core : 규소강판

그림 4. 리니어 모터의 구조

Fig 4. The configuration of a linear induction motor.

전기적 특성을 그림(3)와 그림(4)에 보였다.

부상용 전자석에 인가되는 전류 파형은 duty ratio 50:50의 PWM 제어 방식의 최대 20 [A]의 진폭을 갖는 2 [KHz] 구형파로 조사되었으며, 리니어 모터에 인가되는 전류 파형은 시속 40 [Km]로

주행시에 rms 7 [A]의 24 [Hz] 3상 정현파로 조사 되었다.

2. 누설 자속의 등자위선

그림(2)에 보인 자기부상열차 모형에서의 자속밀

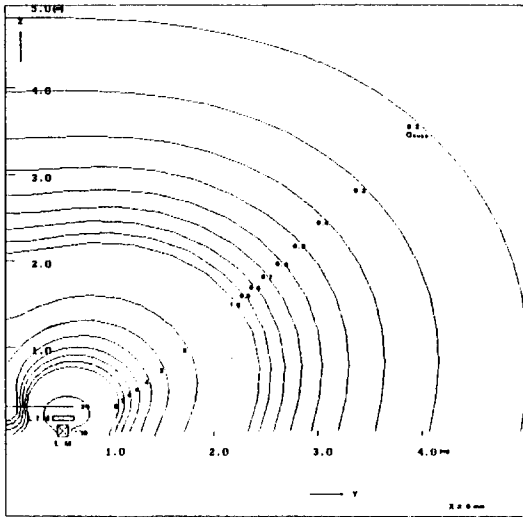


그림 5. $x=0$ mm 인 $y-z$ 평면(A-A')에서의 등자위선

Fig 5. The equi-potential contour of flux, at $x=0$ mm, $y-z$ plane (A-A').

도분포에 대한 등자위면 선을 열차 모형의 중심에서 x방향으로 거리 0 mm 떨어진 곳의 단면 A-A'와 거리 230 mm 떨어진 곳의 단면 B-B' 각각의 경우에 따라 그림(5)와 그림(6)에 보였다.

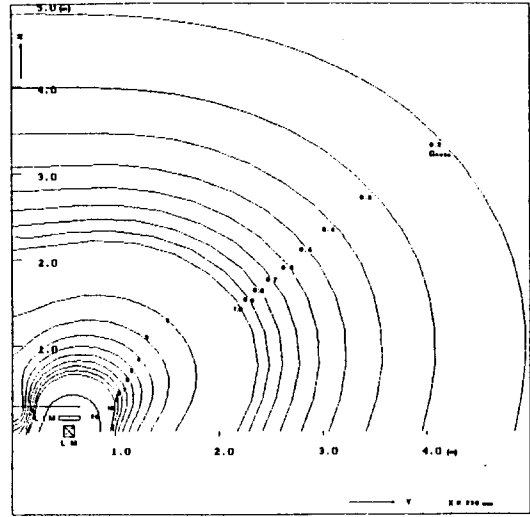


그림 6. $x=230$ mm 인 $y-z$ 평면(B-B')에서의 등자위선

Fig. 6 The equi-potential contour of flux, at $x=230$ mm, $y-z$ plane (B-B')

3. 차폐방법

제 IV장 1절에서 구한 열차 모형의 자속밀도를 차폐하기 위한 자성체의 차폐 두께를 구한다.

부상용 전자석의 상측 (z 방향) 300 mm 위치와 측면 (y 방향) 700 mm 위치에 차폐판을 설치하는 경우에 대하여 차폐 물질의 포화 자속밀도 B_s 가 1.55

[T], 1.1[T], 0.7[T]로 각각 다른 자성재료에 대해서 계산하였다.

이 각각의 값들은 표1.에서 알 수 있듯이 Ni-Fe 계열의 센델타 금속과 Si-Fe 계열의 SD, Ni-Fe 계열의 TMC 금속의 포화 자속밀도 값을 예로 든 것이다[13].

표 1. 예시된 자성 재료의 자화특성

Table 1. The Properties of magnetic materials.

합금 계열	명칭 (재질기호)		상표명	주성분	대표적 자화 특성				도전율 [$\mu\Omega \cdot \text{cm}$]
					μ_i	μ_m	B_s [T]	He[Oe]	
Si-Fe	(SD)			9.5%Si 5.5% μ	30,000	120,000	1.1	0.02	80
Ni-Fe	센델타		Deltarax	50%	600	100,000	1.55	0.1	40
	TM 합금	TMC	Muretal	78%	25,000	80,000	0.7	0.02	

위에서 예로들은 금속을 차폐 재료로 사용하기 위해서는 먼저 차폐 위치에 수직으로 입사되는 자속밀도를 계산하여야 한다.

부상용 전자석으로부터 상측 300 mm에서 거리 y에 따른 자속밀도의 z 성분과 y 성분의 크기를 그림(7)과 그림(8)에 각각 보였다.

여기서 자속밀도의 z 성분 크기는 상측 차폐두께를 계산하기 위해 필요하며, 자속밀도의 y 성분 크기는 측면 차폐두께를 계산하기 위해 필요하다.

각각의 경우에 대해 차폐용 자성체의 포화 자속밀도 B_s 가 1.55 [T], 1.1 [T], 0.7 [T]일때의 최적 차폐두께를 위치에 따라 계산하여 그림(9)부터 그림 11. 에 보였다.

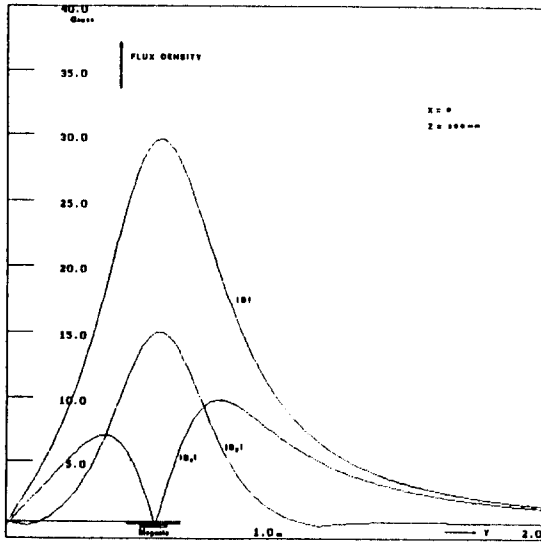


그림 7. $x=0$ 인 $y-z$ 평면(A-A')에서의 자속밀도 크기
Fig 7. The magnitude of flux density at $x=0$ mm, $y-z$ plane(A-A')

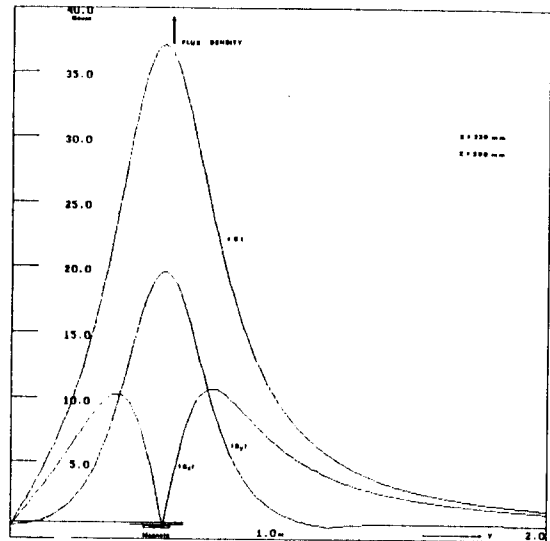
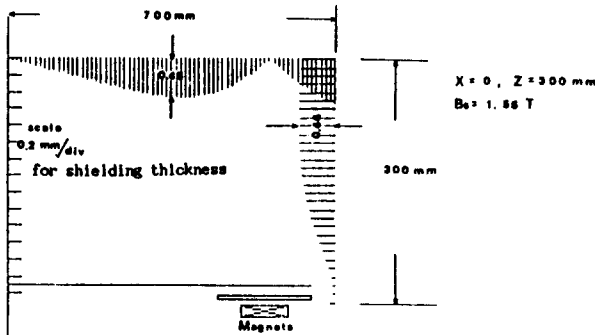
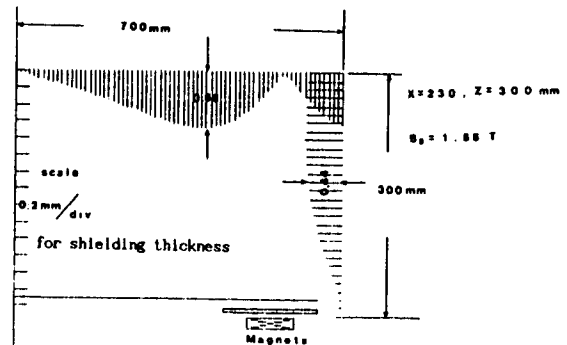


그림 8. $x=230$ 인 $y-z$ 평면(B-B')에서의 자속밀도 크기.
Fig 8. The magnitude of flux density at $x=230$ mm, $y-z$ plane(B-B')

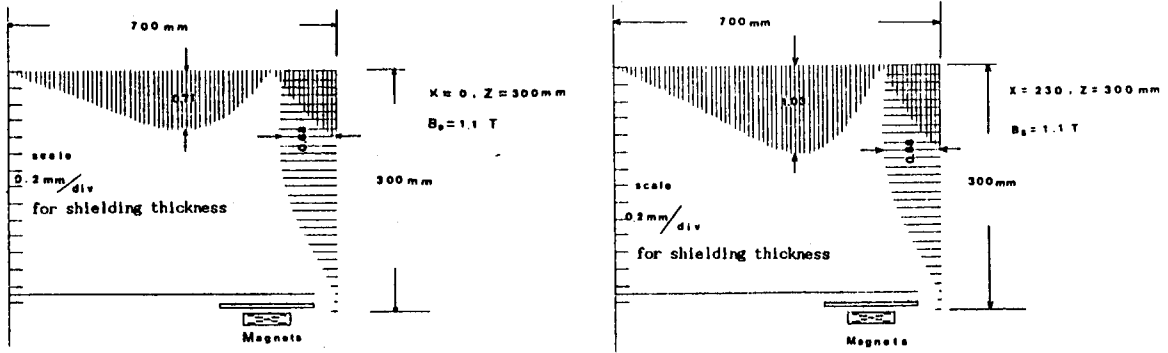


(a) $x=0$ mm인 $y-z$ 평면 (A-A')



(b) $x=230$ mm인 $y-z$ 평면 (B-B')

그림 9. $B_s=1.55$ [T]를 사용한 경우 $z=300$ mm에서의 차폐 두께
Fig 9. The shielding thickness at $z=300$ mm when $B_s=1.55$ [T].

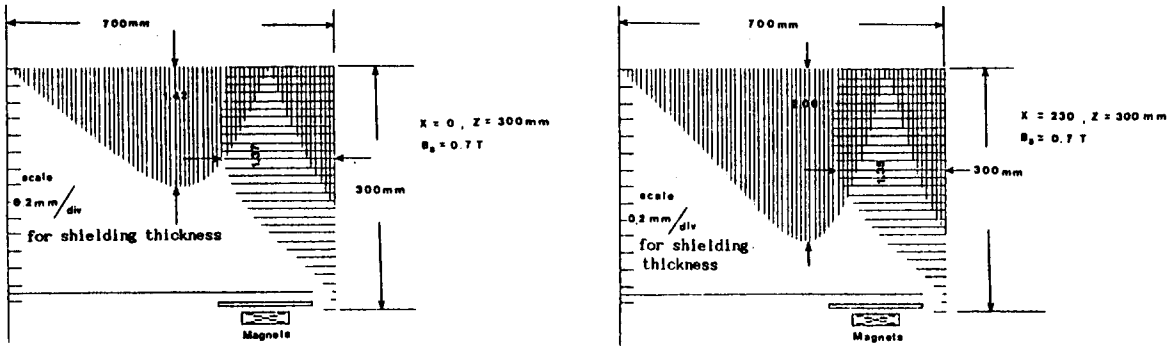


(a) $x=0\text{mm}$ 인 $y-z$ 평면 (A-A')

(b) $x=230\text{mm}$ 인 $y-z$ 평면 (B-B')

그림 10. $B_s=1.1\text{T}$ 를 사용한 경우 $z=230\text{mm}$ 에서의 차폐두께

Fig. 10 The shielding thickness at $z=300\text{mm}$ when $B_s=1.1\text{T}$.



(a) $x=0\text{mm}$ 인 $y-z$ 평면 (A-A')

(b) $x=230\text{mm}$ 인 $y-z$ 평면 (B-B')

그림 11. $B_s=0.7\text{T}$ 를 사용한 경우 $z=300\text{mm}$ 에서의 차폐 두께.

Fig 11. the shielding thichness at $z=300\text{mm}$ when $B_s=0.7\text{T}$

열차 모형에서의 누설 자속 분포는 열차 모형의 $z=300\text{mm}$ 에서 B_z 성분의 최대치는 약 15 [Gauss] 정도이므로 이것을 0.15 [Gauss] 이하로 차폐시키기 위해서는 40 dB 정도의 감쇄가 필요하다.

예로들은 차폐재료에 따른 차폐두께에 대해 식 (17)을 적용하여보면 표2. 와 같이 포화 자속밀도가 1.55T 인 재료를 사용하는 경우에는 31.71 dB에서 34.96 dB 가 감쇄되었으며, 1.1T 를 사용하는 경우

표 2. 차폐금속에 따른 차폐효과

Table2. Shielding effectiveness depending on materials.

차폐재료의 자화특성			$y-z$ 평면, $z=300\text{mm}$ 에서의 차폐두께[mm]	SE_{dB} [dB]	차폐무게 감량비율
B_s [T]	μ_m	ρ [$\mu\Omega\text{-cm}$]			
1.55	100,000	40	0.45-0.66	31.71-34.96	50% 이상
1.1	120,000	80	0.17-1.03	37.15-40.34	50% 이상
0.7	80,000	60	1.42-2.06	39.62-42.82	50% 이상

에는 37.15dB에서 40.34dB, 0.7T를 사용하는 경우에는 39.62 dB에서 42.82 dB가 감쇄되었다. 또한 각 경우의 차폐두께가 최대 두께로만 설계된 경우에 비해 감량되는 무게비는 50% 이상이었다.

VI. 결 론

자기부상열차 시스템에서의 불요 자기장 발생을 Biot-Savart 법칙으로 열차 주위의 자속밀도를 시뮬레이션하고 이 결과를 이용하여 열차 바닥 측면에서의 최소 차폐두께를 계산하였다.

본 연구의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션 방법을 독일, 일본, 캐나다에서 설계 제작된 자기부상열차에 적용하여 잘 일치함을 확인 후, 한국해사기술연구소에서 설계제작한 2인승 자기부상열차 모형에 적용하였다.

여기서 얻어진 결과는 부상용 전자석과 리니어 모터에 인가되는 전류의 파형에 따른 AC 성분의 변동자계만이 주로 존재하였으며, 그 최대 피크값은 열차 모형의 탑승바닥에서 약 40[Gauss] 정도, 열차 모형에서 1 m 거리에서 약 4[Gauss] 정도가 계산되었다.

이 값은 변동자계에 대한 외국의 규제값을 매우 크게 상회하는 값으로 적절한 차폐방법이 필요함을 할 수 있었다.

이때문에 본 연구에서는 계산한 변동자기장의 값이 외국의 규제값들 중에서 최소값인 0.15[Gauss] 이하로 차폐하도록 하기 위한 차폐물질에 따른 최소의 차폐두께를 컴퓨터 시뮬레이션으로 제시하여, 차폐재료의 무게를 50% 이상 감량할 수 있었다.

본 연구에서 얻어진 결과는 초저주파 이하 직류까지에서의 자기장에 대한 최적 차폐 구조를 설계하는데 매우 효과적으로 사용가능함을 알 수 있었다.

또한 이 설계 과정은 외국의 연구 조사에서 알수 있듯이 EMI 현상이 매우 중요한 문제로 대두되는 미래의 초전도 자기부상열차 시스템, 의료용 자기공명장치 등에서 차폐 기술에 대한 기초연구가 될 것이다.

参 考 文 献

- [1] W.F Hayes, "Magnetic field shielding for electrodynamic Maglev vehicles," IEEE International Conference, 1987.
- [2] 鐵道綜合技術研究所 浮上式 鐵道開發推進本部, "Linear motor car-MagLev," 清文社, 日本, 1988.
- [3] Klaus Heinrich, "Transrapid MagLev System", Hestra-Verlag Darmstadt, 1989.
- [4] Y. Iwasa, "Magnetic shielding for Magnetically levitated vehicles," Proc. IEEE, Vol. 61, No. 5, pp. 598-603, May 1973.
- [5] ____, "韓日 科學과 健康 symposium '90 : 磁氣의 生體現像과 物理醫學", 대한전자공학회, 1990.
- [6] P.F. Kennelly, "Some Physiological experiments with magnets at the Edison Laboratory," N.Y. Med. J., 56 : 729, 1982.
- [7] Ketchen EE et al., "The biological effects of magnetic fields on man," Am. Ind. Hyg. Assoc. 39, 1-11, 1978.
- [8] ____, "Electromagnetic field : the jury's still out," IEEE Spectrum, pp. 22-35, August, 1990.
- [9] S.Ratnajeevan, and H. Hoole, "Computer-aided analysis and design of electromagnetic devices," Elsevier, 1989.
- [10] D. R. J. White, M. Mardiguian, "Electromagnetic Shiledign," Interference Control Technologies, Inc., 1988.
- [11] Donald R.J. White, "EMC Handbook, Vol. 1. - Vol.5," Don White Consultant, Inc., 1972.
- [12] ____, "A handbook series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Vol. 1 - Vol. 12," ICT, Inc., 1988.
- [13] 田中秀之, "電磁石の設計と應用", トリケップス, 1988.