아마츄어 및 레일의 구조 변화에 따른 전류 인덕턴스 경도 및 접촉력의 영향 연구

A Study on Effects on Current Density Distribution, Indu and Contact Force by Variation of Armature and R

金 復 基*
(Bok-Ki Kim)

Abstract - The distribution of current in the conductors influenced by the armature geometry and velocity is an important parameter for determining performance of an electromagnetic launcher(EML). The electric current in the early launching stage tends to flow on the outer surfaces of the conductors, resulting in very high local electric current density. However, the tendency for current to concentrate on the surface is driven by the velocity skin effect later in launching stage. The high current density produces high local heating and, consequently, increases armature wear which causes several defects on EML system. This paper investigates the effects of rail/armature geometry on current density distribution, launcher inductance gradient (L'), and contact force. Three geometrical parameters are used here to characterize the railgun system. These are the ratio of contact length to root length, relative position of contact leading edge to root trailing edge, and the ratio of rail overhang to the rail height. The distribution of current density, L', contact force between various configurations of the armature and the rail are analyzed and compared by using the EMAP3D program.

Key Words : Electricmachinery, Railgun, Armature, Inductance Gradint, Contact Force

1. 서 론

레일건(railgun) 설계 시 레일건의 효율을 극대화하기 위하여 다양한 레일(rail) 및 아마츄어(armature)의 구조가 연구되어 왔다[1,2,3]. 현재 블럭(block)형 혹은 C형의 아마츄어 구조에 돌출구조(overhang)의 레일 모양을 이용한 정방형 레일건 구조가 많이 이용되고 있다. 블럭형 아마츄어는 가장 간단한 구조이며, C형 아마츄어는 발사과정에서의 아마츄어와 레일 사이에 금속 접촉을 강하게 유지할 수 있는 가장 현실적인 구조라고 생각되고 있다[2]. 아마츄어는 전자추진체(Electromagnetic Launcher, EML)에서 가장 중요한 역할을 담당하고 있는데, 그것은 아마츄어의 구조가 금속접촉이탈(transition)현상 발생을 일으키는 가장 중요한 설계변수로서 레일건 성능을 결정하는데 중요하기 때문이다. 일반적으로 아마츄어와 레일 도체상의 전류밀도의 분포는 이동 중인 아마츄어의 속도, 아마츄어의 구조 및 레일의 돌출구조, 아마츄어 및 레일의 재질 등에 영향을 받는다.

초기 발사단계에서는 전류의 흐름이 도체의 외부 표면에 집중되는 표피효과(skin effect)로 인하여 모서리 지역에 매우 높은 전류 밀도가 분포된다. 한편, 발사가 진행한 후에는 빠른 아마츄어 속도에 의한 속도표면효과(velocity skin effect)의 증가로 인하여 아마츄어 및 아마츄어가 접촉한 레일의 후단부 표면에 전류의 밀도가 높아지는 현상을 보인다. 이 때 발생하는 고전류 분포로 인하여 국부적으로 매우 높은 열이 발생하며, 이로 인하여 아마츄어의 접촉면에 손상을 입히게 되고, 따라서 레일과 아마츄어 사이의 금속접촉이탈 현상을 일으킬 수 있을 만큼 큰 영향을 주는 것이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 가능한 전류 밀도가 아마츄어와 레일의 접촉면에서 균일하게 분포되도록 아마츄어의 구조를 설계하여야 하는데, 이점에 대하여 다양한 방법이 제안되었다. 일반적으로 레일이나 아마츄어의 재질인 구리 및 알루미늄 표면에 저항률이 큰 다른 재질을 입혀서 균일한 전류 밀도를 유도하는 방법, 여러 겹의 아마츄어를 이용하는 방법, 아마츄어의 구조의 변형을 통하여 균일한 전류 밀도를 유도하는 방법 등이 있는데, 이를 이용하여 국부적으로 발생하는 열 문제를 해결하는 연구가 진행되었다[1,2].

최초로 Long[1]은 전류 및 속도의 영향이 레일건의 성능에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석할 수 있는 방법을 제안하였다. Long의 박사학위 논문에서 2차원 유한요소법(finite element method, FEM)을 이용하여 다양한 레일 및 아마츄어 설계와 재질에 따른 주울 열 효과를 근거로 하여 레일건이 도달할 수 있는 한계속도를 계산하였다 한편 Yun과 Price[3]는 레일건과 통합 발사추진체(integrated launch package)의 전자기적 및 구조적 해석을 3차원 모델을 이용하여 해석하였다.

이 논문에서는 레일 및 아마츄어의 구조가 전체 레일건 시스템의 전류 밀도, 인덕턴스 강도 및 아마츄어와 레일의 접촉력(contact force)에 미치는 영향을 3차원 유한요소법을

* 正 會 員 : 光云大 電子工學科 助教授 · 工博
接受日字 : 2000年 10月 12日
最終完了 : 2001年 2月 18日

이용하여 맥스웰 방정식을 수치해석적으로 접근하였다. 여기서는 레일건의 구조에 의해 가장 영향을 많이 받는 접촉면과 수직으로 형성되는 전류 성분을 다양한 레일건 구조를 통하여 비교 분석하였다. 또한 2차원으로 해석한 인덕턴스 경도(L', H/m)와 3차원 유한요소법을 통하여 수치해석적으로 계산한 인덕턴스 경도의 결과를 비교하였고, 접촉력을 계산하여 최적의 아마츄어 구조에 관하여 논의하였다. 본 논문은 2장에서 3차원 유한 요소법의 적용을 위한 다양한 아마츄어 구조에 대한 시뮬레이션 및 다양한 구조와 구조 변수에 대하여 다루었다. 3장은 이러한 구조들을 시뮬레이션하여 얻어진 결과들을 비교 설명하였으며, 3차원 수치해석 및 2차원 해석적 방법으로 계산된 인덕턴스 경도의 결과에 대하여 다루었다. 또한 레일과 아마츄어간의 접촉력(contact force)을 비교하여 적절한 아마츄어의 모양을 예측하였다. 이 논문의 결론을 4장에 기술하였다.

2. 레일건의 구조 및 시뮬레이션

일반적으로 전기기계적인 시스템의 해석은 세가지의 편미분 방정식 즉, 전자기 확산 방정식(electromagnetic diffusion equation), 열 확산 방정식(thermal diffusion equation) 및 모멘텀 방정식(momentum equation)등으로 기술할 수 있다. 그 중 여기서는 전자기 확산 방정식만을 이용하여 해석하였다. 전자기 확산 방정식은 맥스웰 방정식에서 변위전류가 전류밀도에 비해 무시할 수 있다고 가정하였다.[5]

그림 1은 일반적인 레일건의 개념도를 보여준다. 하단 레일에 전류를 흘리면 전류는 하단 레일과 아마츄어와 상단 레일을 통하여 흐르게 되며, 이 때 이 전류에 의해 두 레일 안쪽에 자기장이 발생하게 된다. 전류밀도와 자기장이 세기가 상대적으로 큰 아마츄어의 후면과 그 후방에서 전류와 자기장은 거의 90도로 교차되어 $F = J \times B$에 의해 힘이 발생되어 아마츄어에 추진력을 주게된다. 여기서 상단 레일과 하단 레일 역시 힘을 받게 되나 발사체에 고정되어 있어 움직이지 않고, 오직 아마츄어만이 진행방향으로 움직이게 된다.

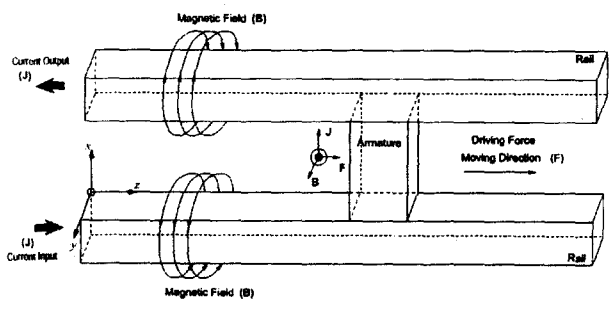

그림 1 일반적인 레일건의 개념도

Fig. 1 Schematic diagram of a general railgun system

그림 2는 본 논문에서 이용한 레일건 구조를 보여준 것이다. 레일건의 구경은 20 mm × 20 mm의 정방형의 모양이다. 레일에 사용된 재질은 ETP 구리 합금으로 두께가 5 mm이며, 아마츄어는 7071 T651 알루미늄 합금으로 블럭형 혹은 C형의 구조를 갖는다. 일반적으로 그림 2에서 보는 바와 같이 아마츄어의 구조는 접촉면후방점(A), 접촉면전방점(B), 중간후방점(C) 및 중간전방점(D) 등의 4개의 점으로 설명할 수 있다. 여기서는 모델링을 단순화하기 위하여 곡면의 아마츄어 구조는 고려하지 않았다. 또한 레일건의 구조는 대칭적으로 설계되기 때문에 전체 구조의 1/4만을 유한요소(finite element) 모델링하였다.

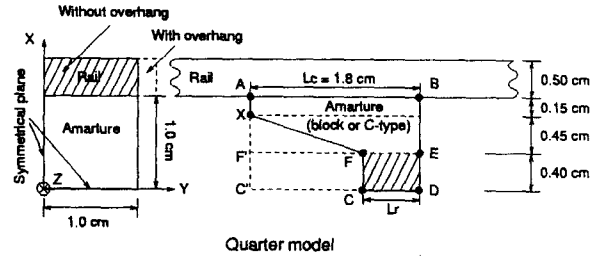

그림 2 레일건의 구조. 여기서 (A) 접촉면후방점, (B) 접촉면전방점, (C) 중간후방점, (D) 중간전방점이다

Fig. 2 A Structure of the railgun system where (A) Contact trailing edge, (B) Contact leading edge, (C)Root trailing edge, (D) Root leading edge

우선 아마츄어 중간면적비(Rroot)는 레일과 아마츄어 사이의 접촉면의 길이(Lc = B-A)와 아마츄어 중심의 중간면의 길이(Lr=D-C)와의 비로 정의하였다. 한편 접촉면전방점(B)과 중간후방점(C)의 상대적인 위치는 전류의 흐름에 따른 최저 인덕턴스 경로를 결정하는 만큼 매우 중요한 변수로 고려될 것이다. 시뮬레이션을 위한 다양한 아마츄어의 구조를 만들기 위해서 (A), (B) 및 (X) 점을 고정하고, 선(F-C) 및 선(E-D)가 레일과 평행하게 이동하게 하여 여러가지 형태의 구조를 구성하였다. 예를 들면, 그림 2의 선(F-C)가 선(F'-C')로 이동하면 블럭형 아마츄어가 되는 것이다. 또한 레일돌출비(rail overhang ratio)는 레일의 폭이 아마츄어의 폭보다 얼마나 넓은가를 나타내는 변수이며, 레일의 돌출부는 레일건 시스템에서 레일을 고정하기 위해 고려되는 부분이다.

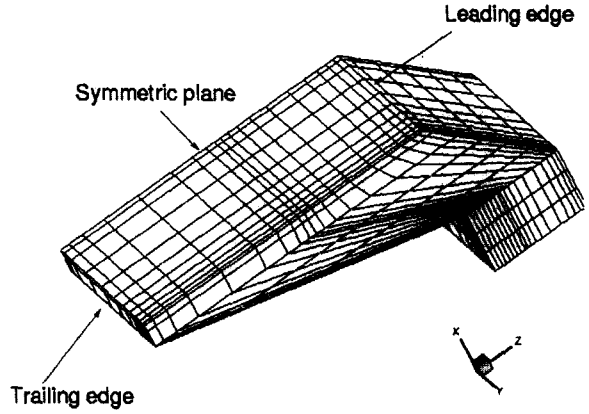

그림 3 유한요소법을 이용하기 위한 일반적인 C형 아마츄어의 유한요소 mesh

Fig. 3 A typical FE mesh of the detailed armature mesh for a "C"-shaped armature

그림 3은 유한요소법을 이용하기 위한 전형적인 C형 아마츄어의 유한요소 mesh이다. 레일도 같은 형태로 mesh를 구성한다. 여기서 좌표의 선택은 아마츄어의 진행방향을 z축으로 하고, 레일과 아마츄어와의 접촉면에 수직인 방향을 x축으로 선택하였다. 아마츄어의 전방 및 후방 부분에 매우 좁고 균일하지 않은 mesh를 이용하였는데, 이것은 이 부분에 급격한 전류의 밀도 변화가 있어 수치해석 시 매우 민감한 부분이기 때문이다.

수치해석적 시뮬레이션을 위하여 IAT(Institute for Advance Technology)에서 개발한 3차원 유한요소법을 이용한 EMAP3D(Electromagnetic and Mechanical Analysis Program in 3 Dimension) 프로그램이 이용되었다[5]. EMPA3D는 전기기기 시스템의 저주파 특성으로 인하여 맥스웰 방정식에서 $\partial D/\partial t$ 항을 무시하고 여기에 기계적인 해석을 위한 방정식을 포함하고 있어, 모터나 compulsator와 같이 도체의 이동이 있는 시스템을 해석할 수 있도록 프로그램 되어있다. 아마츄어의 속도 변화에 따라 전류 밀도 분포가 많은 영향을 받지만, 여기서는 정지 상태에 있는 레일건 시스템에 대해서만 시뮬레이션이 수행되었다. 5 x 104 A의 단위 계단파 형태의 전류가 레일의 한쪽 끝에 가해졌다. 도체상의 전류의 흐름으로 인한 열 효과를 무시하였으며, 레일 및 아마츄어 사이의 금속접촉(metal contact)은 완전 금속접촉을 가정하였다. 전류 밀도의 시뮬레이션 결과는 0.25ms에서 비교하였다. 한편, Kerrisk의 2차원 모델이 고주파제한 특성을 가정하였기 때문에 10ms에서의 Kerrisk의 인덕턴스 경도 결과와 0.25ms의 3차원 시뮬레이션의 인덕턴스 경도를 비교하였다[4].

3. 다양한 구조 변수에 따른 시뮬레이션 결과 및 비교

이 장에서는 전류 밀도, 인덕턴스 경도 및 접촉력의 비교를 위하여 아마츄어 구조변형에 관한 세가지 구조 변수, 즉 아마츄어 중간면적비, C형 구조비 및 레일돌출비등에 따른 다양한 형태의 레일건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 분석하였다.

3.1 아마츄어 중간면적비 (Rroot)

우선 2장에서 정의한 아마츄어 중간면적비의 변화에 따른 레일/아마츄어 접촉면의 전류밀도 분포의 변화를 시뮬레이션 하였다. 그림 4은 아마츄어의 중간면적비가 다른 4가지의 아마츄어의 측면을 보여준다. 여기서 레일구조는 포함하지 않았다. 접촉면전방점, 접촉면후방점 및 전방중간점의 위치는 고정되어 있고 후방중간점(그림 2의 선F-C)의 위치가 아마츄어의 이동 방향으로 움직이면서 여러 가지 구조를 만들어 내었다. 여기서 아마츄어의 폭과 레일의 폭이 같은 것으로 가정하였다.

중간후방점(그림 2의 점C)의 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타냈다. 전류의 흐름은 인덕턴스의 값이 최저인 경로를 따라 형성되기 때문에 고전류 밀도 분포 지역이 후방 중간점의 움직임을 따라 이동하는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 5는 중간후방점의 위치가 레일/아마츄어 접촉면 상의 전류 밀도 분포에 영향을 준다는 것을 보여준다. 그러나 최고 전류밀도 분포지역은 접촉면후방점(그림 2의 점A) 부분인 것을 볼 수 있는데 이것은 이 부분으로 모든 전류가 모이기 때문이다.

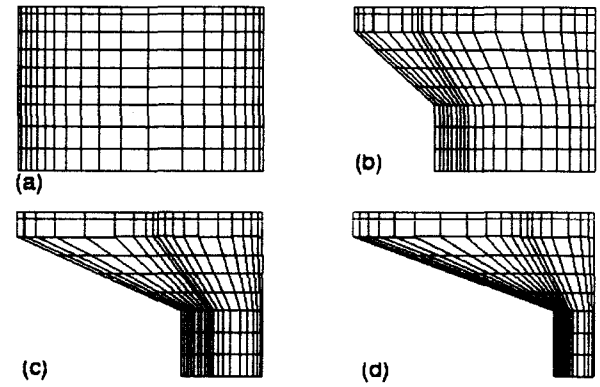

그림 4 다양한 중간면적비에 따른 아마츄어의 유한요소 mesh. (a) Rroot = 1 (b) Rroot = 2/3 (c) Rroot = 1/3 (d) Rroot = 1/6

Fig. 4 Finite element mesh configurations of armatures for different root ratios. (a) Rroot = 1 (b) Rroot = 2/3 (c) Rroot = 1/3 (d) Rroot = 1/6

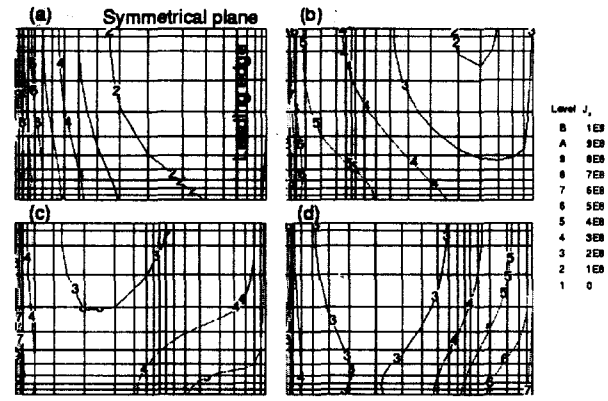

그림 5 중간면적비에 따른 레일/아마츄어 접촉면에서의 전류밀도분포(Jx). (a) Rroot = 1 (b) Rroot = 2/3 (c) Rroot=1/3 (d) Rroot = 1/6

Fig. 5 Current density (Jx) distributions over the rail/armature contact interface for different root ratios. (a) Rroot = 1 (b) Rroot = 2/3 (c)Rroot=1/3 (d) Rroot = 1/6

3.2 C형 구조비 (Rctype)

여기서는 C형 구조비가 전류밀도 분포에 어떠한 영향을 주는지를 살펴보았다. C형 구조비는 아마츄어의 중간후방점(그림 2의 점C)과 접촉면전방점(그림 2의 점B)과의 상대적인 위치를 의미한다. C형 구조비는 그림 2을 이용하여 Rctype= (C - B) / Lr와 같이 정의한다. 그림 6은 아마츄어의 C형 구조비가 다른 4가지의 아마츄어의 측면을 보여준다. 여기서 레일구조는 포함하지 않았다. 중간면적비가

Rroot=1/3인 구조(그림 4의 C)을 이용하였으며, 접촉면전방점(그림 2의 B)과 접촉면후방점(그림 2의 점A)의 위치는 고정되어 있고, 중간전방점(그림 2의 선E-D)과 중간후방점(그림 2의 선F-C)의 위치가 아마츄어의 이동 방향으로 움직이면서 다양한 C형 구조비를 만들어 내었다. 여기서 레일의 폭은 아마츄어의 폭과 같은 것으로 가정하였다.

C형 구조비에 따른 전류밀도 분포에 관한 시뮬레이션의 결과를 그림 7에 나타내였다. C형 구조비에 따른 레일/아마츄어 접촉면의 전류밀도 분포는 그림 7에서와 같이 C형 구조비가 증가하면서 최저 인덕턴스 경로인 접촉면전방점 부분에서 전류밀도 분포는 점점 커지게 됨을 볼 수 있다. 그러나 최대 전류밀도 분포는 접촉면후방점 부분임을 볼 수 있어 이 부분의 온도가 가장 높고 따라서 아마츄어 마모가 가장 심한 부분임을 예상할 수 있다

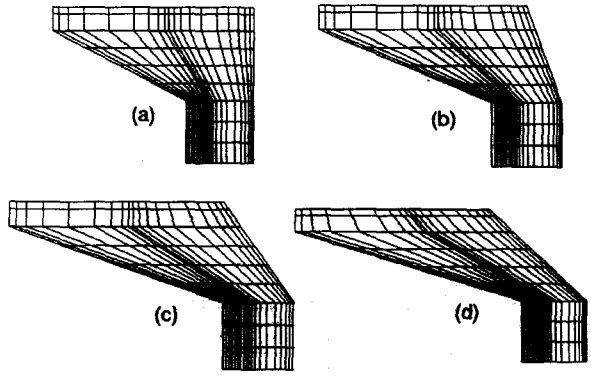

그림 6 서로 다른 C형 구조비에 따른 유한요소 mesh. (동일한 Rroot = 1/3 조건) (a) Rctype = 1.0 (b) Rctype = -0.5 (c) Rctype = +0.0 (d) Rctype=+0.5

Fig. 6 Finite element mesh configurations for the different "C"-type ratios with a fixed Rroot = 1/3. (a) Rctype = -1.0 (b) Rctype = -0.5 (c) Rctype=+0.0 (d) Rctype = +0.5

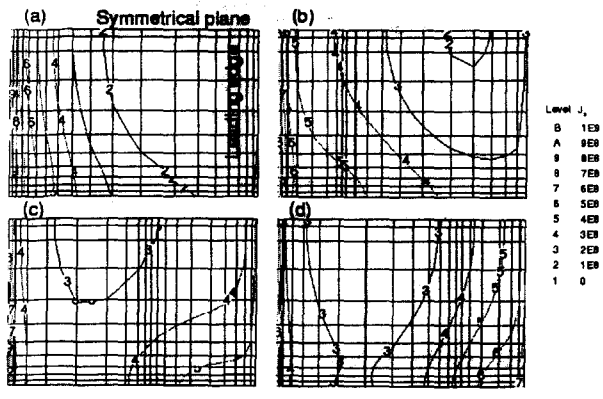

그림 7 서로 다른 C형 구조비에 따른 레일/아마츄어 접촉면상의 전류 밀도(Jx) 분포의 비교. (동일한 Rroot = 1/3 조건) (a) Rctype = 1.0 (b) Rctype = -0.5 (c) Rctype = +0.0 (d) Rctype=+0.5

Fig. 7 Current density Jx distributions for different "C"-type ratios with Rroot = 1/3 (a) Rctype = 1.0 (b) Rctype = -0.5 (c) Rctype = +0.0 (d) Rctype=+0.5

3.3 레일돌출비 (Roh)

이 절에서는 레일돌출비에 따른 접촉면에서의 전류 밀도의 변화를 비교하였다. 그림 8은 여러 가지 레일돌출비에 따른 레일건의 모양을 나타낸 것이다. 레일돌출비란 아마츄어 대비 레일 돌출부분의 폭과 아마츄어의 폭의 비이다. 그림 8 (b)에서 레일돌출비 Roh = Loh / Larm 와 같이 정의하였다. 모든 경우에 Larm 은 1cm로 고정되어 있고 블럭형 아마츄어와및 그림 6의 C형구조비의 Rctype= -1.0 및 Rctype= +0.0의 세 가지 경우에 시뮬레이션을 수행하였으며, 이 결과를 3.4절의 인덕턴스 경도를 계산하는데 이용하였다.

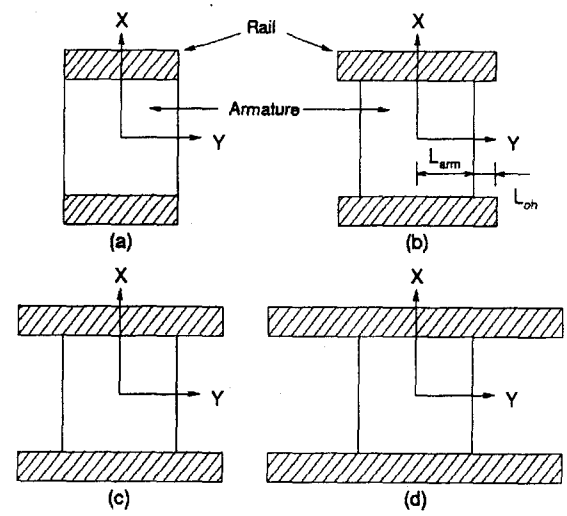

그림 8 서로 다른 레일돌출비에 따른 레일건의 단면. (a) Roh = 0 (b) Roh = 0.2 (c) Roh=0.4 (d) Roh = 0.8, (Larm = 1 cm)

Fig. 8 Cross-sectional views for different overhang ratios. (a) Roh = 0 (b)Roh = 0.2 (c)Roh=0.4 (d) Roh = 0.8 (Larm = 1 cm)

그 중에 블럭형 아마츄어 구조의 전류밀도에 관한 시뮬레이션 결과만을 그림 9에 보여주었다. 그림 9을 보면 접촉면의 전류밀도 분포는 레일돌출비에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 레일 돌출비가 증가하면 할 수록 자기장이 아마츄어 전방으로 많이 분포되는 현상으로 접촉면전방점 부분과 아마츄어 측면에 많은 전류가 흐르는 것을 보여준다. 만일 레일 돌출이 없는 경우(그림 9의 a)에는 접촉면전방점 부분의 전류밀도는 매우 낮으며 전류가 접촉면후방점 부분에 집중되고 있음을 알 수 있다. C형 아마츄어의 전류밀도 분포는 블럭형의 아마츄어의 전류밀도 분포와 유사하지만, 전류가 이미 아마츄어 전방부로 집중되어 있기 때문에 분명하지 않는 면이 있다. 여기서는 레일의 돌출부분이 전류밀도 분포를 아마츄어의 접촉면후방점 부분에서 접촉면전방점 부분으로 움직이게 하는 현상을 볼 수 있다. 일반적으로 레일돌출비를 약 0.2에서 0.4가 되게 한다[6].

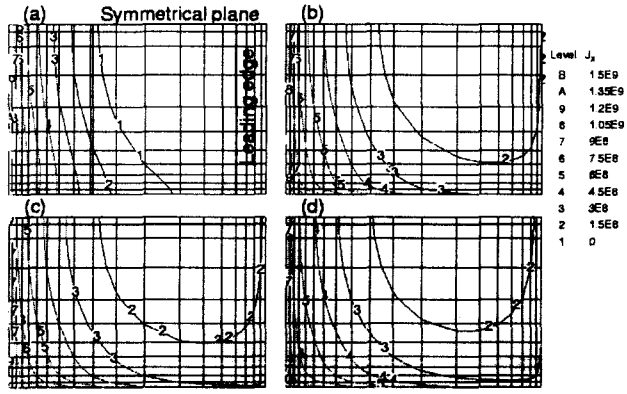

그림 9 블럭형 아마츄어에서 레일돌출비에 따른 레일/아마츄어 접촉면 상의 전류밀도 분포 (Jx) 비교. (a) Roh = 0 (b) Roh = 0.2 (c) Roh = 0.4 (d) Roh= 0.8

Fig. 9 Current density distributions (Jx) for different rail overhang ratios for a block armature. (a) Roh = 0 (b) Roh = 0.2 (c) Roh = 0.4 (d) Roh= 0.8

3.4 인덕턴스 경도(L')의 비교

표 1에 3차원 유한 요소 수치해석 시뮬레이션과 Kerrisk의 2차원 해석적 모델에서 계산된 인덕턴스 경도를 레일돌출비에 따라 비교하였다[4]. 위의 두 방법을 이용한 인덕턴스 경도는 약 2.5%의 차이가 있음을 보였다. 일반적으로 2차원 모델에서 계산된 인덕턴스 경도의 값이 3차원 시뮬레이션 결과보다 크게 나타나는데 이것은 2차원 모델에서는 아마츄어의 전방부에 자기장이 없다는 것을 가정했기 때문이다. 3차원 시뮬레이션으로부터 계산되는 인덕턴스 경도는 아래의 추진력의 관계식으로부터 계산된다[1,5].

$$F = J \times B = 1/2\ L'I2 \qquad (1)$$

레일돌출비가 증가할수록 전류밀도 분포가 아마츄어의 전방과 측면으로 균일하도록 이동한다는 사실로부터 인덕턴스 경도가 작아진다는 결론을 표 1로부터 얻을 수 있다. 그리고 레일의 완벽한 고정을 위한 무리한 레일돌출은 인덕턴스 경도를 감소시켜 추진력을 약하게 하는 결점을 갖게된다. 그러나 레일과 아마츄어의 접촉면의 전류밀도를 아마츄어 후단부에 집중시키는 것을 방지하고 접촉면 상에 어는 정도 전류밀도를 분산하는 효과는 있으나 아직 정확한 결론을 내릴 수는 없다. 또한 표 1과 표 2로부터 C형 아마츄어의 인덕턴스 경도는 C형 구조비에 크게 영향을 받지 않는다는 사실도 알 수 있다. 이는 추진력에 영향을 주는 전류성분(Jz)가 C형 구조비의 크게 영향을 받지 않기 때문인 것이다.

표 1 0.25ms에서 3차원 유한요소 수치해석 시뮬레이션과 10ms에서 2차원 Kerrisk의 해석적 방법에 의한 인덕턴스 경도(mH/m)의 비교.

Table 1 Comparison of L (mH/m) due to the rail overhang between the 3-D numerical simulations at t= 0.25 ms and a 2-D analytical approach of Kerrisk at t = 10ms [4]

레일돌출비 (%)	Kerrisk [4]	Rctype = -1.0	Rctype = +0.0
0	0.5278	0.5248	0.5224
20	0.4824	0.4904	0.4904
40	0.4447	0.4536	0.4528
89	0.3855	0.3960	0.3952

표 2 0.25ms에서 레일돌출이 없는 C형 아마츄어의 인덕턴스 경도(mH/m)의 비교. (2차원 Kerrisk의 해석적 방법에 의한 인덕턴스 경도는 0.5278)

Table 2 Comparison of L (mH/m) of "C"-type armatures without rail overhang at t=0.25 ms. (Kerrisk's value is 0.5278 mH)

C형 구조비		아마츄어 중간면적비	
Rctype	L'	Rroot	L'
-1.0	0.5248	-	-
-0.5	0.5232	2/3	0.5272
+0.0	0.5224	1/3	0.5248
+0.5	0.5256	1/6	0.5208

3.5 접촉력(contact force)의 비교

아마츄어의 중간면적비와 C형 구조비를 이용한 다양한 레일건 구조에 대하여 레일과 아마츄어 사이의 접촉력을 비교하였으며, 표 3은 그 결과를 정리한 것이다. 접촉력은 식 (1)의 F = J x B 에서 레일과 아마츄어 접촉면과 수직한 성분(Fx)을 따로 계산하여 단위 면적으로 평균을 낸 것이다. 접촉력은 레일과 아마츄어 사이에 금속접촉이 되도록 유지시키는 힘으로 금속접촉이탈이 일어나지 않도록 하는 중요한 변수이다. 아마츄어 중간면적비는 작으면 작을수록 C형 구조비가 커지며, 이에 따른 접촉력은 증가하는 것을 표 3을 통하여 알 수 있다. 이것은 아마츄어 구조중 후방 부분의 날개 각도(그림 2의 선FX와 선FF'가 이루는 각도)가 감소하여 전류의 성분중 아마츄어의 진행방향 성분(그림 3의 Jz)이 증가하는 현상과 C형으로 인한 아마츄어의 날개 부분의 감소한 강도가 결합된 현상으로 이해할 수 있다. 그러나 중간면적비에 따른 접촉력의 크기는 선형적으로 변하지 않았으며, 아마츄어의 중간점의 폭이 아마츄어의 강도를 결정하는 변수이므로 그 폭을 고려하면 Rroot = 1/3에서 최적임을 알 수 있다. 한편 블록형의 아마츄어 형태에서는 접촉력이

매우 낮은 것으로 보여지며, 이러한 사실로 인하여 실제적인 아마츄어의 구조에는 사용하지 않는다. 또한 C형 구조비의 변화에 따른 접촉력 역시 아마츄어의 날개 부분의 각도가 감소함에 따라 커지는 사실을 알 수 있으나, 이 또한 선형적이지 않았고 C형 구조비가 증가함에 따라 접촉력의 변화가 완만해지는 모습을 볼 수 있다. 이러한 사실을 통하여 금속 접속이탈을 방지하기 위한 최적의 아마츄어 구조는 C형이기는 하지만 무리한 C형 구조비의 증가는 아마츄어의 강도에 문제가 있으므로, Rroot = 1/3과 Rctype = - 0.5인 아마츄어 구조에서 최적임을 예측할 수 있다.

표 3 아마츄어 중간면적비와 C형 구조비에 따른 접촉력(kN/m2) 비교

Table 3 Comparison of contact force depending on the root ratio and the C-type ratio

아마츄어 중간면적비		C형 구조비	
Rroot	접촉력	Rctype	접촉력
1(블럭)	37	-1.0	227
2/3	147	-0.5	311
1/3	227	+0.0	345
1/6	298	+0.5	368

4. 결 론

이 논문은 레일 및 아마츄어의 구조변화에 따른, 레일 및 아마츄어의 접촉면상에서의 전류밀도, 인덕턴스 경도와 접촉력에 관하여 연구하였다.

여러 가지 구조변수의 변화에 따른 세 가지의 형태의 레일건 구조를 3차원 유한요소법을 이용하여 수치해석적 시뮬레이션을 수행하였다. 돌출구조비, 중간면적비 및 C형구조비에 따라 전류밀도가 현저히 변화하는 사실을 확인하게 되었다. 한편 인덕턴스 경도는 레일돌출구조비에 많은 영향이 있었고, 아마츄어 형태에 따른 변화는 그리 크지 않은 것으로 보여진다. 2차원 해석적 모델에서 계산된 인덕턴스 경도와 3차원 유한요소법에 의한 인덕턴스 경도를 비교한 결과 고주파 제한 특성을 감안해 볼 때 근사한 값을 갖는 것으로 결과가 도출되었다. 또한, 접촉전방점과 중간후방점의 상대적의 위치가 전류가 흐르는 경로를 따라 형성되는 최저 인덕턴스 경도에 영향을 주는 것으로 밝혀졌으며, 아마츄어 설계 시 가장 중요한 구조 변수라는 사실을 알게 되었다. 한편, 접촉력의 비교를 통하여 C형 아마츄어의 접촉력이 다른 구조에 비해 상대적으로 월등한 결과를 통하여 C형 아마츄어가 레일건 시스템에 가장 적절한 구조임을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] G. C. Long, "Fundamental limits to the velocity of solid armatures in railguns," The University of Texas at Austin, Dissertation, pp. 171, August 1987.

[2] R. A. Marshall, C. Persad, K. A. Jamison, and M. J. Matyac, "Observation of solid armature behavior," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, no. 1, pp. 214-218, January 1995.

[3] J. J. Price and H. D. Yun, "Design and testing of integrated metal armature sabots for launch of armor penetrating projectiles from electric guns," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, no. 1, pp. 219-223, January 1995.

[4] F. Kerrisk, "Current distribution and inductance calculation for railgun conductors," Los Alamos National Laboratory Report LA-9092-MS, October 1980.

[5] K. T. Hsieh, "A Lagrangian formulation for mechanically, thermally coupled electromagnetic diffusive processes with moving conductors," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, no. 1, pp. 604-609, January 1995.

[6] Scott Levinson, Jerald V. Parker Kuo-ta Hsieh & Bok-ki Kim, "Electrical and thermal effects of rail cladding," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 1, pp. 417-422, January 1999.

저 자 소 개

김 복 기 (金 復 基)

1960년 2월 15일 생. 1991년 The University of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1998~2000년 광운대학교 전임강사. 현재 광운대 전자공학부 조교수.