특집 : 리니어모터의 응용기술

리니어모터의 열 해석 설계기술

박 현 수
(넥스타 테크놀로지(주) 연구소장)

1. 서 론

Linear motor 설계에 있어서 열적 거동의 파악은 모터의 연속 추력 및 열변형과 관련하여 매우 중요한 고려요소 중의 하나이다. 여기서는 반도체장비에 장착하기 위한 Linear motor의 설계에 앞서 코일에서 발생되는 열에 의한 모터의 온도 분포 및 Forced air cooling의 효과를 사전에 시뮬레이션함으로써 향후 상세 기구 설계에 참고가 될 수 있을 것이다.

2. 설계방법

2.1 모델링

해석의 목적은 다음 3가지 경우의 온도분포를 비교하는 것에 있다.

Case 1 : Motor assembly alone (Model 1)

모터가 공기 속에 떠 있다고 가정한 것으로 가장 높은 온도 분포를 보일 것이다.

Case 2 : Motor with additional structure (No forced cooling, Model 2)

반도체장비에서 Linear motor는 부가적인 구조물에 장착되어 Linear guide의 구속방향에 따라 움직이게 되며 이 경우를 가정하여 Inductor top surface 약 3배에 해당하는 Plate를 모터 위 및 아래에 부착하였을 때를 해석한 것이다.

Case 3 : Motor with additional structure (forced cooling, Model 3)

Case 2와 동일하나 Inductor에 부착된 Plate에 공기로 강제냉각을 했을 경우이다.

Core type linear motor를 있는 그대로의 형상으로 해석하기는 매우 어려워 현실적인 설계방법으로서 각각의 부품에 대하여 단순화된 모델을 사용하였으며 Pro Engineer를 이용하여 모델링한다.

2.1.1 Model 1

그림 1은 Case 1 해석을 행하기 위해 모터만 모델링 한 것으로 각각 입체도와 분해도를 나타낸 것이며 그림 2는 단면도를 나타낸 것이다.

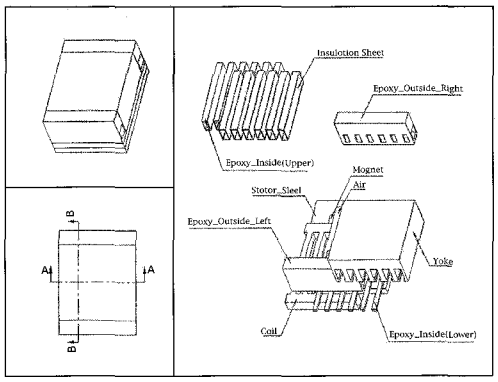

그림 1. Model 1

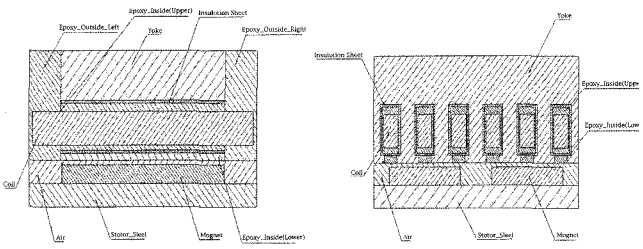

그림 2. Model 1의 단면도

2.1.2 Model 2

그림 3은 Case 2와 Case 3를 해석하기 위해 모터와 부가적 구조물을 함께 모델링한 것으로 입체도와 정면도를 나타낸다.

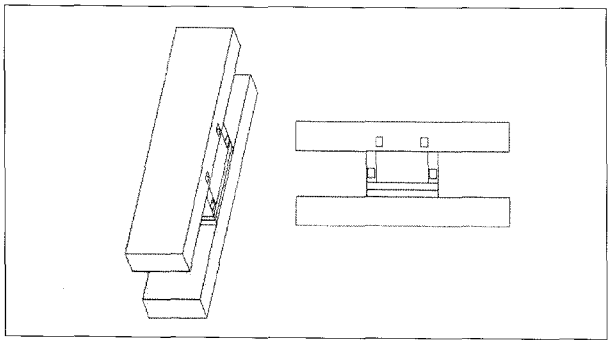

그림 3. Case 2 및 Case 3

2.2 Preprocessing

형상 모델링의 경우 Pro Engineer를 이용하여 수행하며 이후의 해석은 ANSYS를 사용한다. Pro Engineer에서 형상 데이터를 igs file을 사용하여 ANSYS에서 Import할 경우 Surface만 넘어 가므로 다시 ANSYS상에서 Volume과 Mesh를 생성해야 한다.

2.2.1 File Import

Pro Engineer에서 모델을 IGES로 변환하여 Export하고 ANSYS를 열고 File menu의 Import를 한다.

2.2.2 Volume Generation

igs file은 Surface 정보만을 가지고 있으므로 ANSYS에서 다시 Volume을 생성시켜야 한다(Main Menu 〉 Preprocessor 〉 Modeling 〉 Create 〉 Volumes 〉 Arbitrary 〉 By Areas). 이상의 단계로 들어가서 이미 알고 있는 각각의 Feature에 대한 Area를 지정하여 Volume을 생성하는 작업을 반복한다.

2.2.3 Glue

원하는 Volume을 생성하고 난 후에는 각각의 Volume 경계면들이 붙어 있다는 것을 ANSYS에서 인식해야 제대로 Mesh를 나눌 수 있고 계산을 할 수 있다. ANSYS에서 이러한 기능을 하는 명령어로 Glue라는 명령어가 있으며 Import option에서 Alte no defeature를 선택해야만 사용할 수 있다. 사용방법은 Main Menu 〉 Preprocessor 〉 Operate 〉 Glue 〉 Volumes 을 선택하여 서로 붙어야 하는 Volume들을 선택한 다음 Apply나 OK를 선택하면 된다. Glue 후에는 원래 지정되었던 Volume no.가 지워지고 새롭게 Volume no.가 지정되며 Area 또한 새롭게 추가되거나 No.가 바뀌는 경우가 생기므로 각각의 Volume이나 Area에 대한 No.를 Boundary condition이나 Load를 부가할 때를 대비하여 확인해 둬야 한다.

2.2.4 Element Type Setting

Volume 생성이 끝난 후에는 해석에 사용될 Element type

표 1. 재질특성

Vol. No		Material, No.	Thermal Conductivity (μ W/mm · K)	Density (kg/mm3)	Specific Heat (μ J/kg · k)
Model 1	Model 2				
2, 3	2, 3	NdFeb,1	8949	0.0000075	502080000
5-10, 18-23 35, 36	5-10, 18-23 39, 40	Epoxy, 2	800	0.0000018	900000000
26	26	Silicon steel(4%), 3	66100	0.0000078	434000000
27	30	Steel 1018(C 1%), 4	45000	0.0000078	460000000
28-33	31-36	Insulation Sheet, 5	180	0.00000093	1340000000
34	38	Air, 6	30	0.000000000995	1009000000
37	41	Cu, 7	385000	0.0000089	380000000
	29	Steel(S45C), 8	51900	0.0000078	446000000
	37	Aluminum, 9	175000	0.0000027	875000000
Convecitive Heat Transfer Coefficient(μ W/mm^2 · K)					
Air Hole		강제 공랭시(Case.3)	250		
		Case.2	50		
나머지 부분		Case.1, 2, 3	50		

을 지정해 주어야 한다. 본 모델의 경우 Free mesh를 사용하기 위해 10-node tetrahedron element를 사용하였다.

Main Menu 〉 Preprocessor 〉 Element Type 〉 Add/Edit/Delete 〉 Add 〉 Thermal Solid 〉 Tet 10 node 87 로 지정하면 된다.

본 모델의 형상의 특징상 Brick 8 node 70을 사용하는 것이 더 적합하지만 이 경우에는 Mapped mesh를 사용하여야 하며 치수상의 문제로 굉장히 복잡한 과정이 되므로 Free mesh를 사용하였다.

2.2.5 Material Property Setting

Element type을 지정한 후에는 각각의 Volume에 대한 Material property를 지정하게 된다. 열전달 해석에서 가장 중요한 Material property는 Thermal conductivity 및 Convective heat transfer coefficient이며 적용된 값은 표 1과 같다.

2.2.6 Define Attributes

Element type과 Material property의 입력이 끝났으면 각각의 Volume에 대해서 Element type과 Material property를 지정해야 한다. Preprocessor 〉 Attributes 〉 Picked Volumes에서 Volume을 지정하고 Apply를 하면 나타나는 창에서 각각의 Volume에 해당하는 Material no.와 Element type을 지정한다.

2.2.7 Meshing

본 모델링의 특성상 Brick 8 node element를 사용하여 Mapped mesh를 사용하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되나 시간이 너무 많이 걸리고 본 해석의 경우 정성적 경향을 보고자 하는데 있으므로 Free mesh를 사용하였다. Preprocessor 〉 Meshtool 〉 Global 〈 Size, Element Edge Length 지정 Mesh 〈 원하는 volume을 지정하여 적용한다.

Size의 경우 Insulation sheet의 경우는 1.5를 Top plate 및 Bottom plate는 6, 그리고 나머지는 3을 적용하였다. 총 Element의 개수는 Model 1의 경우 약 120,000개, Model 2 및 3의 경우 약 150,000개로 한다.

2.3 Solution

Meshing이 끝나면 Boundary condition 및 Initial condition 및 Load를 적용하고 계산을 하는 과정에 들어가게 된다.

표 2. Model 1의 Symmetry surface와 Convection surface

Description	Vol. No.	Convection	h(μ W/mm^2 · K)	Symmetry
Yoke	26	663	50	662, 664
Stator Steel	27	335, 337, 339	50	336, 338
Air	34	353, 358	50	13, 14
Epoxy_outside_right	35	569, 572	50	568, 570
Epoxy_outside_left	36	597, 600	50	596, 598
Coil	37	-	-	497, 499, 509, 511

표 3. Model 2 및 3의 Symmetry surface와 Convection surface

Description	Vol. No.	Convection	h(μ W/mm^2 · K)	Symmetry
Yoke	26		50	682, 684
Bottom Plate	29	1, 2, 689, 693, 694	50	3, 4
Stator Steel	30	357, 359	50	356, 358
Top Plate	37	17, 18, 695, 697, 700	50	19, 20
		701, 702, 703, 704	50 for model.2	
		705, 706, 707, 708	250 for model.3	
Air	38	373, 378	50	21, 22
Epoxy_outside_right	39	592	50	588, 590
Epoxy_outside_left	40	620	50	616, 618
Coil	41	-	-	517, 519, 529, 531

2.3.1 Analysis Type 지정

본 해석의 목적이 정상상태에서의 온도분포를 보는데 있으므로 Main Menu 〉 Solution 〉 Analysis Type 〉 New Analysis 〉 Steady-State로 지정한다.

2.3.2 Accuracy Level 지정

Fast Sol' n Optn을 사용하여 해의 수렴에 대한 Tolerance를 지정하여 Accuracy와 계산시간을 조정할 수 있다. Main Menu 〉 Solution 〉 Fast Sol' n Optn 〉 TOLER에서 원하는 값으로 지정한다. 본 해석에서는 5를 사용하였으며 이 경우 Tolerance는 $1X10^{-5}$이다.

2.3.3 Boundary Condition 적용

표 2 및 표 3에 각 모델의 Symmetry surface와 Convection surface의 Area no.를 나타낸다.

2.3.4 Coil의 Heat Generation

본 설계에서 코일은 Constant heat source로 가정하였으며 단위 체적당 발생하는 열량은 $2272㎽/mm^3$이다. Main Menu 〉 Solution 〈 Loads 〈 Apply 〈 Thermal 〈 Heat Generat 〈 On Volumes에서 코일에 해당하는 Volume no.를 지정하고 다음을 입력한다.

2.3.5 Initial Condition

모터의 초기온도는 300 K로 한다. Steady-state의 경우 초기 온도를 줄 필요가 없으리라 판단되나 일단 초기온도를 부여하는 것으로 하였다. Main Menu 〉 Solution 〈 Loads 〈 Apply 〈 Initial Condit' n 〈 define에서 Box로 모든 Element를 지정한다.

2.4 Post Processing

Solve가 끝난 후 해석결과를 보는 과정이 Post Processor이다. 본 해석에서 관심이 있는 부분은 온도분포이므로 다음과 같이 진행한다. Main Menu 〉 General Postproc 〉 Plot Results 〉 Contour Plot 〈 Nodal Solu 〈 DOF Solution 〈 Temperature TEMP를 선택한다.

2.4.1 해석결과

1) Model 1

그림 4는 Model 1의 온도분포를 나타내었다. 가장 온도가 높은 부분은 코일로 약 125℃ 정도이며 가장 낮은 곳은 Solid로 모델된 Air로 약 35℃이다. 그림 5의 Inductor 내부의 온도만을 표시한 경우 코일과 Yoke 상부의 온도차는 약 10℃에 불과하며 그 이유는 yoke의 큰 열전달 계수에 기인하는 것으로 판단되며 자석 및 Stator steel의 온도분포로 자석의 경우 52℃에서 55℃정도의 온도분포를 보이고 있다. 자석의 경우 온도가 높아지면 감자현상이 일어나므로 반드시 동작온도 이하에서 사용해야 하며 본 과제에서 선정된 자석의 경우 80℃ 이하이다.

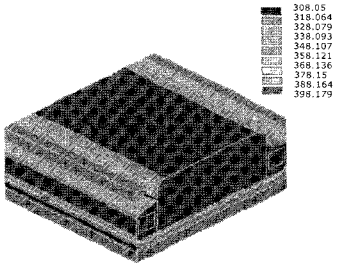

그림 4. Model 1의 온도분포

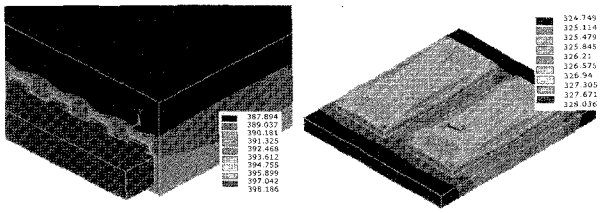

그림 5. Model 1 내부의 온도분포

2) Model 2

그림 6은 Model 2의 온도분포를 나타내었다. 가장 온도가 높은 부분은 코일로 약 63℃ 정도이며 가장 낮은 곳은 Bottom plate로 대기온도와 거의 비슷한 28℃~33℃의 온도분포를 보이고 있다. Model 1에서의 계산결과는 코일온도가 125℃로 약 62℃의 온도하강 효과를 보이고 있다. 이러한 계산결과는 Convective heat transfer coefficient에 따라 차이를 보이리라 판단된다.

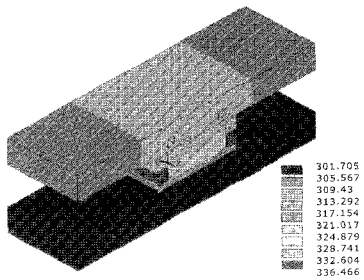

그림 6. Model 2의 온도분포

그림 7의 Inductor 내부의 온도만을 표시한 경우 코일과 yoke 상부의 온도차는 약 14℃ 정도이며 자석 및 stator steel의 온도분포로 자석의 경우 29℃에서 30℃정도의 온도분포를 보이고 있다.

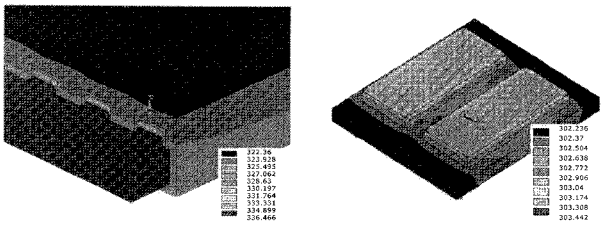

그림 7. Model 2 내부의 온도분포

3) Model 3

그림 8은 Model 3의 온도분포를 나타낸다. 가장 온도가 높은 부분은 코일로 약 57℃ 정도이며 가장 낮은 곳은 Bottom plate로 Model 2와 거의 같은 온도분포를 보이고 있다. Model 2의 코일온도 63℃와 비교할 때 약 6℃의 온도하강 효과를 보이고 있다. Top plate 온도의 경우 Model 2가 44℃~52℃, Model 3이 37℃~44℃로 약 4℃의 온도하강 효과를 보이고 있다. 그림 10에서 나타낸 Inductor 내부의 온도를 비교할 경우 Yoke top surface에서 Model 2는 49℃, Model 3은 42℃로 역시 7℃의 온도하강 효과를 보이고 있으며 자석온도의 경우 거의 비슷한 온도분포를 보이고 있다.

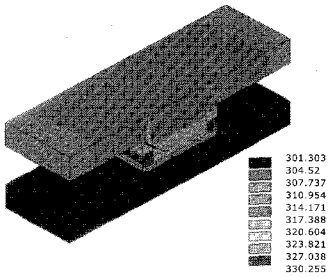

그림 8. Model 3 내부의 온도분포(1)

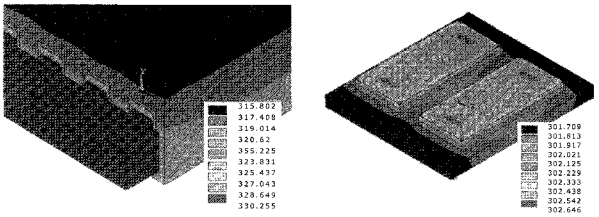

그림 9. Model 3 내부의 온도분포(2)

2.4.2 Convective heat transfer의 차이에 따른 온도분포의 변화

여기서는 Convective heat transfer coefficient의 변화가 미치는 온도분포의 변화를 보기 위해 h를 절반수준인 25로 설정하여 각각의 모델의 재해석하였다. 단, Model 3에서의 강제냉각 Hole에 사용된 250은 그대로 사용하였다. 그림 10에서 그림 12는 그 결과를 나타낸다. 주목할 만한 변화는 Model 1에서의 코일온도가 191℃로 기존의 125℃에 비해 66℃의 온도 상승을 보이고 있다는 것으로 온도분포에 있어서 Convective heat transfer coefficient의 중요성을 나타낸다.

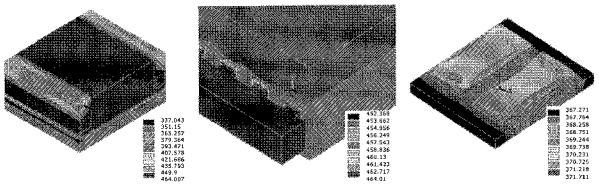

그림 10. Model 1의 온도분포

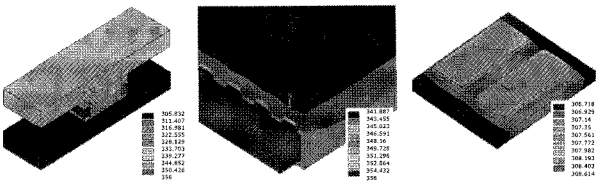

그림 11. Model 2 온도분포

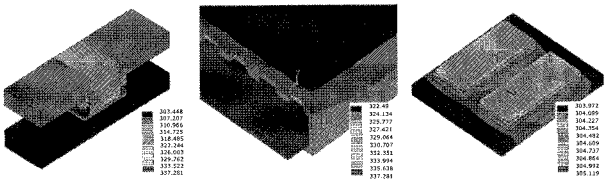

그림 12. Model 3 온도분포

지금까지의 해석결과를 정리하면 표 4와 같다.

3. 결 언

지금까지 반도체장비에 장착된 Core type linear motor에 대한 단순화 모델을 사용하여 온도분포에 관한 수치해석을 수행하였다. 모델이 가진 한계 내에서 수치해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- Coil과 Yoke top surface간의 온도차이는 약 10℃~15℃이다.

표 4. 결과요약

	Model 1(℃)		Model 2(℃)		Model 3(℃)	
	h=50	h=25	h=50	h=25	h=50	h=25
Coil	125	191	63	83	57	64
Yoke Top	115-116	181-182	49-51	69-70	42-44	49-51
Magnet	52-55	95-98	29-30	34-36	29-30	31-32
Top Plate			44-52	66-72	37-44	45-53
Bottom Plate			29-33	33-38	28-32	30-34

- Yoke top surface의 3배에 해당하는 면적을 가진 부가구조물을 장착할 경우 코일의 온도하강 효과는 60℃~110℃ 정도로 매우 효과적이다.
- 강제냉각을 사용할 경우 코일의 온도가 높을 수록 온도하강 효과가 크다.
- 자석의 경우 동작온도가 80℃이상일 경우 무난하다고 판단된다.

본 모델에서는 경험에 기반하여 Convective heat transfer coefficient를 예상하는 온도분포에 적합한 방식으로 설정하였다. 실제의 Convective heat transfer coefficient는 실험결과에 비추어 수정되어야 하며 해석에 있어서도 모터의 평균이동 속도 및 자석과의 공극을 반영하여 유속해석 및 온도해석을 ANSYS가 아닌 전용 S/W에서 수행하여 그 결과를 모델에 반영해야 하리라 판단된다. 해석결과에서도 나타났듯이 모델의 온도분포는 Convection을 어떻게 모델링하느냐에 따라 큰 차이를 보이므로 이의 정확한 모델링이 반드시 필요하게 된다.

〈저 자 소 개〉

박현수(朴賢洙)

1958년 11월 13일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 전기공학과 졸업(석사). 1984년~1986년 현대중전기(주) 기술연구소. 1986년~1988년 삼성종합기술원 정밀기기연구소. 1993년 서울대 전기공학과 졸업(박사). 1993년~2000년 삼성테크윈(주) 정밀기기연구소. 2000년~현재 넥스타 테크놀로지(주) 연구소장.