

3차원 유한요소 프로그램을 이용한 농형 유도전동기의 전자계해석

이석원, 신판석
홍익대학교 전기공학과

Analysis of Electromagnetic Field of Squirrel-cage Induction Motor Using 3D FEM Program

Suk-Won Lee and Pan-Seok Shin
Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik Univ.

Abstract - 본 논문은 3차원 유한요소 프로그램을 이용한 농형 유도전동기의 전자장을 해석한 것이다. 2차원 영역에서 해석하기 어려운 누설 인덕턴스를 3차원으로 해석하여 설계 파라미터 선정에 도움을 주고자 하였다. 유도전동기의 공극 자속밀도 분포와 누설 자속밀도 분포를 고찰하고 1[turn]의 coil에 의해 발생하는 자속의 량과 전동기 내부로 통과하는 자속의 량을 비교하여 누설 인덕턴스를 계산할 수 있었다.

1. 서 론

대도시에서의 교통난 해소 및 환경공해 해소의 일환으로 1975년 서울에서 지하철이 처음으로 상업운행이 개시된 이래 서울, 부산 등에 건설되어 운행되고 있다. 기존의 지하철용 견인전동기는 기존부터 직류 직권 전동기를 사용하고 있으나 구조가 복잡하고 보수, 점검 개수가 많으며 정류자가 있기 때문에 고속회전에 어려움이 있으나, 속도제어가 용이하고 기동토크가 크기 때문에 주로 사용되어져 왔다.

그러나 최근 전력전자의 발달에 의해 전동차 구동에 충분한 성능을 발휘할 수 있는 인버터의 개발로 견인전동기로서 유도전동기의 사용이 증가하고 있다. 유도전동기를 견인전동기로 사용함으로써 신뢰성을 높이고 보수성을 향상시키고 동일용량의 직류전동기에 비해 경량화 및 고효율화를 꾀할 수 있으며 회생제동에 의한 지하철 운전비용을 절감시킬 수 있다.

지하철용 견인전동기는 운행에 필요한 전인력을 충분히 유지하면서 가능한 작고 가볍게 설계, 제작되어야 한다. 그러나 현재 우리 나라 지하철에 사용되고 있는 차량은 외국사와의 기술 제휴로 핵심부품을 전량 수입하기 때문에 외국 노선에 맞게 설계된 전동기를 개량하지 않고 그대로 사용하고 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 견인전동기는 정격출력, 최대토크, 크기, 무게 등이 필요이상 크거나 무거운 실정이다. 국내에 지하철 및 경전철의 증가에 의한 추진제어장치 특히 견인전동기의 수요가 증가됨에 따라 견인전동기의 설계 및 해석기술의 정립이 필요하다.

본 연구에서는 현재 국내 지하철에 사용되고 있는 유도전동기의 특성을 유한요소 해석 프로그램인 FLUX3D를 사용하여 해석기법을 연구하고, 견인전동기 표준화 모델 견인전동기에 적용하여 특성을 해석하였다. 본 논문에서는 end-turn 부분의 누설 inductance를 계하기 위해 coil 1[turn]에 의해 유가되는 자속과 전동 내부 즉, air-gap 단면을 통과하는 자속과의 관계를 이용하여 계산되어짐을 증명하였으며, 이 계산되어진 parameter를 이용하여 유도전동기의 특성해석에 도움을 주고자 하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기 3차원 모델의 사양 및 형상

유도전동기의 기본상양은 정격출력 200[kW], 정격주파수 66.5[Hz], 극수 4극, 정격전압 1100[V]이며, 고정자 슬롯은 60개이고 회전자 슬롯은 52개를 가진다. 회전자의 내경은 156[mm]이고, 고정자의 외경은 255[mm]이며, 높이는 220[mm]이다. 그림 1은 전체 형상의 1/8 모델이고 그림 2는 XOZ축을 기준으로 본 것으로 각 첨자는 영역별 이름을 명명한 것이다.

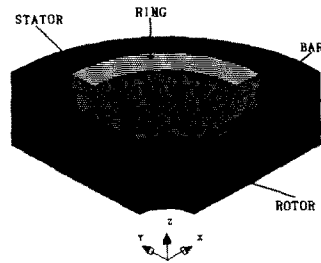


그림 1. 유도 전동기의 해석모델의 formulation 지정 (1/8 모델)

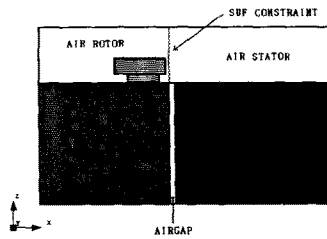


그림 2. 유도 전동기의 formulation 지정 (XOZ축 기준)

그림 1.과 그림 2.에 표기된 영역의 formulation은 표 1.에서와 같이 적용하였다. air-gap과 고정자 air부분(air stator)의 formulation은 M3DRED로, 회전자 air부분(air rotor)의 formulation은 M3DVEC로 하였으며 $\mu_r=1$ 로 입력하였으며, 고정자와 회전자의 formulation은 각각 MD3SCA와 MD3VEC로 지정하였으며 그림 3.과 같은 B-H curve를 입력하였다. 또한, bar와 ring의 formulation은 MD3AV로 하였으며 $\mu_r=1$, 도전율 $\sigma=3.3E07$ (σ/m)으로 입력하여 해석하였다.

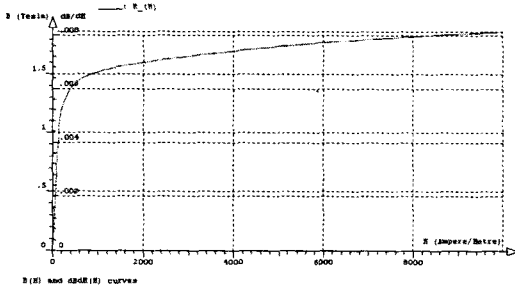


그림 3. stator와 rotor core의 입력 B-H curve

표 1. 유도전동기 정상자계해석시의 formulation

| Region | Formulation |
|--------|---|
| AIRGAP | Reduce scalar potential (M3DRED) |
| AIR | Magnetic vector potential (M3DVEC) |
| ROTOR | |
| AIR | Reduce scalar potential (M3DRED) |
| STATOR | scalar potential (MD3SCA) |
| STATOR | |
| ROTOR | Magnetic vector potential (M3DVEC) |
| BAR | Magnetic vector And Electric scalar potential (MD3AV) |
| RING | Magnetic vector And Electric scalar potential (MD3AV) |

FLUX3D에서는 3차원 model의 여러 가지 경계조 이용이 가능하며 일반적으로 두가지의 경계조건을 사용하지만 전기 기기는 해석면에 주기 및 반주기 조건을 주어서 계산하게 된다. 자계 해석에서 normal 경계조건은 그림 4.와 같이 자속선이 경계면에 수직으로 입사하는 경우를 말하며, tangential 경계조건은 그림 5.와 같이 계면에서 접선을 이루는 조건을 의미한다. 본 연구에서의 유도 전동기는 1/8 model 해석이므로 그림 6.과 같 YOZ면과 XOZ면은 tangent 경계조건을 적용하고, XO면은 normal 경계조건을 적용하여 해석을 시행하였다.

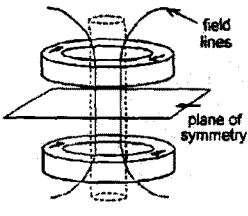


그림 4. Normal 경계조건

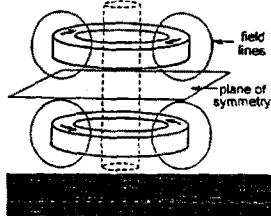


그림 5. Tangential 경계조건

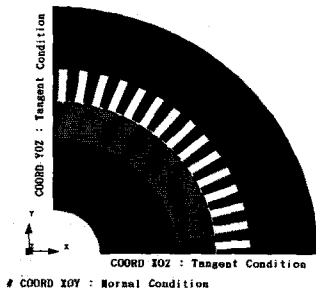


그림 6. 유도전동기 해석상의 경계조건

2.2 3차원 유한요소 프로그램을 이용한 정자계 해석

본 연구에서 자계해석을 유한요소 프로그램인 FLUX3D를 이용하여 해석하였다. 우선적으로, 그림 7.과 같이 유도전동기의 전체 coil이 입력되어 있다면 그림 8.과 같이 1개 coil을 택하여 정상자계 해석을 수행하였다. 여기서, 1(turn)으로 표현된 coil은 사실상 8(coil-turn)으로 구성되어 있으며, 1(coil-turn)당 125[A]의 전류가 흐르게 되므로 결론적으로 1(turn)당 1000[A]의 전류가 흐르게 된다.

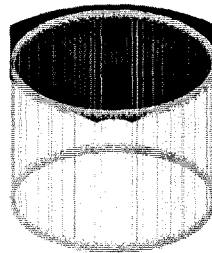


그림 7. 전체 coil의 입력 형상

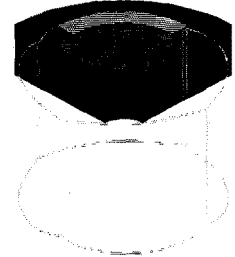


그림 8. 정자계 해석을 위한 1(turn)형상

그림 8.에서 고정자의 1 slot에 1(turn)을 입력한 형상으로 "Multi-saddle turn"으로 표현하였으며 1000[A]를 인가한 것이다.

그림 9.는 누설 inductance 영역의 자속밀도 분포를 나타낸 것으로 본 논문에서 계산하고자 하는 영역의 자속분포를 보여주고 있다. 또한, 그림 10.는 air-gap 영역에서의 자속밀도 분포를 나타낸 그림으로 평균값이 0.038[Tesla]로 계산되었으며, 전체 형상의 1/8 모델을 해석하였으므로 전체 형상에서의 자속량은 선형적으로 추론하여 계산되어질 수 있다. 여기서, 1(turn)에 의해 채교되는 총 자속량을 계산하여 보면 0.00379[Weber]의 값으로 산출되는데 이상의 계산되어진 값들을 이용하여 누설 inductance를 계산해 낼 수 있다.

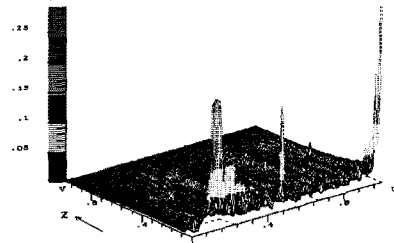


그림 9. 회전자 air 영역의 자속밀도분포

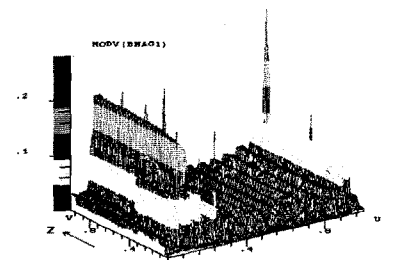


그림 10. 1(turn)에 의한 공극자속밀도분포

그림 11.은 FLUX2D를 사용하여 동일한 유도 전동기의 공극에서의 자속밀도 분포를 보여주는 그림인 반면에 그림 12.는 FLUX3D를 사용하여 계산되어진 공극에서의 자속밀도 분포를 2차원으로 보여주고 있다.

그림 11.과 그림 12.를 비교하여 보면, 2D와 3D상의 해석 결과에서는 입력 전류의 위상 차이가 다소 있기는 하나 값의 차이가 거의 없는 것을 알 수 있었다.

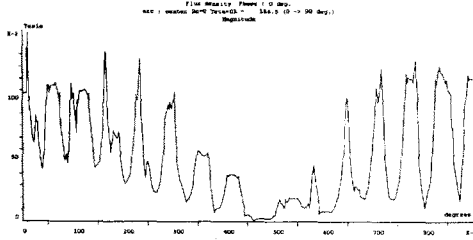


그림 11. FLUX2D에 의해 계산된 공극자속밀도

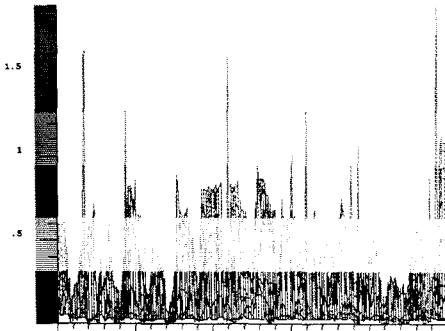


그림 12. FLUX3D에 의해 계산된 공극자속밀도

2.3 누설 Inductance의 계산

고정자 coil에 의한 누설 inductance를 계산하기 위하여, 고정자에서 정격전류로 인가 할 때 회전자에 쇄교하는 자속과 누설자속을 FLUX3D에 의해 얻어진 결과를 이용하기로 한다.

고정자 coil에 의한 inductance는 고정자 1(turn)에 의해 발생된 전체 쇄교자속과 전동기 내부 회전자에 쇄교되는 상호자속을 계산하여 그 차를 누설 자속이라 할 수 있게 되는 것이다.

고정자 coil의 inductance와 전동기 내부의 상호 inductance는 다음과 같이 계산되어진다.

$$L_s = \frac{\lambda_T}{I_s}, \quad L_{Rm} = \frac{\lambda_m}{I_s}$$

여기서, L_s : 고정자 coil의 자기 inductance.

L_{Rm} : 고정자 coil에 의한 상호 inductance

λ_T : 고정자 coil에 쇄교하는 전체 자속량

λ_m : 전동기 내부로 쇄교하는 자속량

I_s : 고정자 coil에 인가된 전류

1(turn)에 쇄교하는 전체 자속 λ_T 는 앞 절에서 0.00379 (Weber)로 계산되어지므로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$L_s = \frac{\lambda_T \times 2 \text{ (1/8 model)} \times \text{Turn수} \times \text{극수(4극)}}{I_s}$$

$$= 19.41 \quad [\text{mH}]$$

이며,

전동기 내부 air-gap영역에 임의의 face를 통과하는 자속량을 계산한 결과 0.00222 (Weber)로 계산되어지므로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$L_{Sm} = \frac{\lambda_m \times 8 \text{ (1/8 model)} \times \text{Turn수}}{I_s}$$

$$= 11.35 \quad [\text{mH}]$$

결론적으로, 누설 inductance(L_l)은 고정자 coil에 의한 inductance(L_s)와 전동기 내부의 상호 inductance(L_{Rm})의 차로 계산되어진다.

$$L_l = L_s - L_{Rm} = 8.06 \quad [\text{mH}]$$

End-turn에 의해 누설된 inductance(L_l)가 8.06 (mH)로 계산되어 졌으므로 유도전동기 설계 parameter중 end-turn의 inductance를 L_l 값으로 사용할 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소 프로그램을 이용하여 200 (kW)급 농형 유도전동기의 정자계 특성을 해석하였다. 고정자 전류에 의한 공극자속밀도분포, end-turn부근의 누설자속밀도분포를 계산하여 분석하였다.전동기의 누설 inductance(L_l)값이 8.06 (mH)로 계산되었으며, 2차원 해석을 위해 선정된 parameter값 5.25 (mH)와 다소 차이가 있기는 하지만 수식적으로 계산되어진 값보다는 좀더 정확한 parameter값이라 생각된다. 물론 3차원 해석이라고 하지만 실제의 coil형상과 같이 두께와 형상을 정확히 구현 할 수는 없으나 비슷한 형태로 만들어 해석이 가능하다.

보충적으로 위에서 제시된 모델에 전체 coil을 입력하여 torque를 계산하여 본 결과 설계상 정격 torque가 970 (Nm)이고 최대 torque가 2743 (Nm)인 반면 해석상의 계산되어진 torque는 205.8 (Nm)이나 1/8 model이므로 8배를 하여 1646 (Nm)의 값을 얻었다.

본 논문에서 제시한 3차원 유한요소 프로그램을 이용한 농형 유도전동기의 정자계 해석은 2차원 영역에서 해석이 불가능한 영역에 대한 고려가 가능하리라 생각되어지고, 동자계 해석시 재질의 비선형 처리 및 moving airgap, 외부회로를 이용한 해석이 구현되어 진다면 좀더 정확한 해석을 할 수 있을 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] "견인전동기의 특성검증을 위한 성능시험 및 해석기법연구 (최종보고서)", 한국철도연구원, 1998
- [2] Gordon R. Selon, "Electric machine", ADDISON WESLEY, 1992
- [3] A. E. Fitzgerald & Charles Kingsley, Jr & Stephen D. Umans, "Electric machinery", McGraw-Hill Book, 1992
- [4] "FLUX3D manual", Magsoft