

# 에어컨 실외기 시스템에서 압축기 특성이 공통 모드 전도 방출 노이즈에 미치는 영향

## Effects of Compressor Characteristics in Outdoor Air Conditioner Units on Common-Mode Emission Noise

정상원 · 김인섭\* · 한준희\* · 나완수\*

Sangwon Chung · In-Seop Kim\* · Junhee Han\* · Wansoo Nah\*

### 요 약

이 연구는 에어컨 실외기 시스템의 압축기 임피던스 특성이 공통 모드 전도성 방출 노이즈에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 압축기의 높은 임피던스가 공통 모드 노이즈 수준을 유의미하게 감소시키는 것을 확인함으로써, 압축기의 임피던스 특성이 전자기 호환성(EMC)을 개선하는 데 중요한 역할을 할 수 있음을 밝혔다. 이는 에어컨 실외기 시스템의 설계와 개선에 있어서 전도성 방출 노이즈를 효과적으로 관리할 수 있는 새로운 접근법을 제시하며, 향후 노이즈 관리 전략 개발에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

### Abstract

This study analyzes how the impedance characteristics of compressors in outdoor air conditioner units affect the common-mode emission noise. The findings reveal that a higher impedance in compressors substantially reduces common-mode noise levels, indicating that the impedance characteristics of compressors play a crucial role in enhancing the electromagnetic compatibility (EMC). These findings highlights a new approach for effectively managing conducted emission noise in the design and improvement of outdoor air conditioner systems, offering vital foundational data for the development of future noise management strategies.

Key words: Compressor Characteristics, Air Conditioner, Common Mode Noise, Conducted Emission Noise, Electromagnetic Compatibility

### I. 서 론

현대의 에어컨에 적용된 인버터 기술을 통해 사용성과 에너지 효율이 많이 향상되고 있다. 하지만 인버터의 전력 반도체 소자의 고주파 스위칭은 전자기 간섭(EMI)을

유발할 수 있다<sup>[1],[2]</sup>.

EMI 문제를 해결하기 위해 에어컨 시스템의 문제가 되는 전자기 간섭을 예측하기 위한 EMI 모델에 대한 연구가 진행되어 왔다. 참고문헌 [3]에서는 인버터 구동 에어컨의 전도 EMI 모델을 완성하기 위한 실용적인 모델링

「이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2023R1A2C2008116).」

성균관대학교 DMC공학부(Department of Digital Media and Communications Engineering, Sungkyunkwan University)

\*성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

· Manuscript received April 29, 2024 ; Revised May 15, 2024 ; Accepted July 2, 2024. (ID No. 20240429-048)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

방법을 제시한다. 전체 에어컨 시스템의 EMI 모델을 바탕으로 가변 주파수 에어컨의 영향 요인을 분석하고 문제가 되는 전자기 간섭을 해결하기 위한 몇 가지 해결책을 제안한다. 참고문헌 [4]에서는 에어컨 시스템의 전자기 간섭을 분석하기 위해 팬과 에어컨 압축기 구동 시스템의 영향 모두 포함한 에어컨의 전도 방출 노이즈를 분석했다. 에어컨 EMI 모델은 팬과 압축기, 전원 장치, PCB, 리액터, AC 케이블 등 실외기 전체를 포함하여 모델링되었다. 그 결과, 에어컨 실외기 노이즈의 주요한 영향 요인은 압축기 시스템이라는 것이 확인되었다.

본 연구는 이러한 배경 하에 에어컨 실외기 시스템 내 압축기의 임피던스 특성이 공통 모드 노이즈에 어떻게 영향을 미치는지에 대해 집중적으로 조사하였다. 압축기는 에어컨 시스템에서 주요한 공통 모드 전도 방출 경로로, 그 임피던스 특성이 공통 모드 전도 방출 노이즈에 어떠한 영향을 주는지를 확인하는 것은 유의미하다. 본 연구는 압축기의 임피던스와 공통 모드 전도 방출 노이즈 간의 상관관계를 밝히는 것에 중점을 두었으며, 에어컨 시스템에서의 공통 모드 전도 방출 경로를 나타내는 간략화된 모델의 시뮬레이션을 수행하고, 실제 실험을 통해 이를 확인하였다.

## II. 에어컨 실외기 시스템의 구조와 공통 모드 전도 방출 노이즈의 전파 경로에 대한 해석

### 2-1 에어컨 실외기의 구조

그림 1은 에어컨 실외기의 구성을 나타낸 것이다. 단상 3선의 전원선을 통해 전원을 공급한다. 3선을 각각  $L$  (live),  $N$  (neutral), 접지라고 할 때,  $L$ 상과  $N$ 상은 실외기 측면에 있는 터미널 블록을 거쳐서 PCB로 연결되고, 접지선은 샤시에 직접 나사를 통해 연결되고, 샤시에서 다시 분기되어 PCB와 접속된다.

PCB에 입력된 전원은 전원단 EMI 필터를 거치게 되고 브릿지 다이오드와 DC Link 커패시터 구조와 같은 평활 과정을 거친다. 이후, 인버터(DC-AC 3 $\Phi$ )를 통해 압축기 및 실외기 팬 모터를 동작시킨다.

압축기 및 팬 모터는 모두 3상 인버터 구동 방식을 통

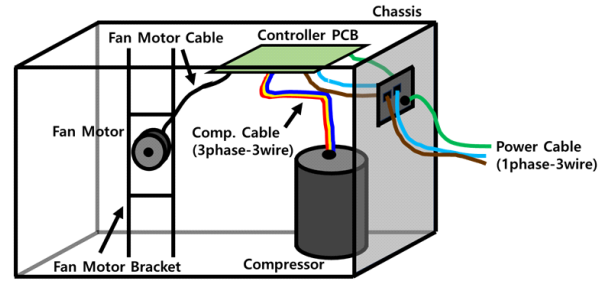


그림 1. 에어컨 실외기의 구성

Fig. 1. Configuration of the air conditioner outdoor unit.

해 동작하고, 선행 연구를 통해 이 중 압축기 구동부가 에어컨 실외기 시스템의 주요한 노이즈원이라는 것이 확인되었다. 이는 에어컨 실외기 시스템의 공통 모드 전도 방출 노이즈를 이해하기 위해 에어컨 실외기 시스템을 간단하게 인버터 구동 모터 시스템으로 해석할 수 있음을 의미한다.

### 2-2 공통 모드 전도 방출 노이즈 전파 경로의 이해

그림 2는 LISN와 EUT 간에 공통 모드 전도 방출 노이즈의 경로를 나타낸다. 공통 모드 전도 방출 노이즈는  $L$ 상과  $N$ 상에 동일하게 흐르며 접지를 통해 흐르는 경로를 형성한다. 이처럼 공통 모드 전도 방출 노이즈는 EUT 내에서 접지로 빠져나오는 전류에 의해 크게 영향을 받을 수 있다.

그림 3은 LISN으로부터 전원을 입력 받아 EMI 필터를 거쳐 인버터에 의해 구동되는 압축기 시스템을 회로도로 나타낸 것이고, 그림 우측의 모터는 압축기 내부의 모터

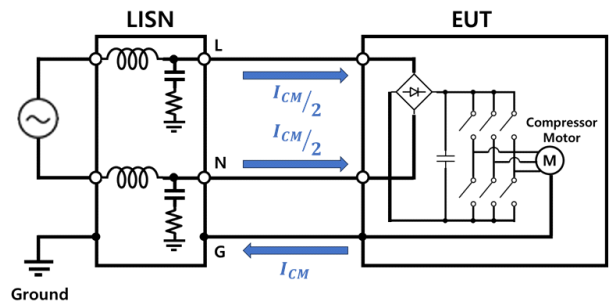


그림 2. 공통 모드 전도 방출 노이즈의 경로

Fig. 2. The path of common-mode conducted emission noise.

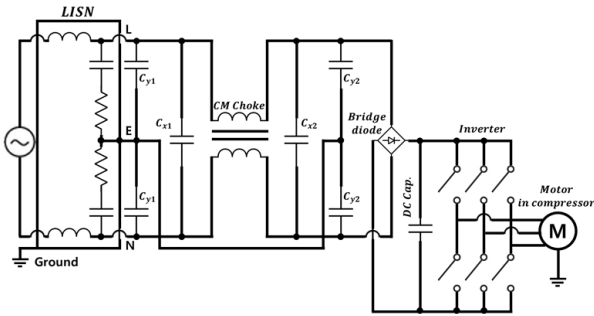


그림 3. LISN에 연결된 에어컨 실외기 시스템의 단순화된 회로  
Fig. 3. Simplified circuit of air conditioner outdoor unit system connected to LISN.

를 나타낸다.  $L$ 상과  $N$ 상으로 입력된 단상 전원은 첫 번째  $Y$  커패시터인  $C_{Y1}$ 과 첫 번째  $X$  커패시터인  $C_{X1}$ 을 지나 CM 초크를 지난다. 그리고 두 번째  $X$  커패시터인  $C_{X2}$ 와 두 번째  $Y$  커패시터인  $C_{Y2}$ 를 지나고, 그 후 브릿지 다이오드와 큰 용량의 DC Link 커패시터를 거쳐 인버터 제어를 통해 3상 압축기로 전달된다.

인버터에서 발생하는 노이즈 성분들이 모터와 접지 간의 기생 커패시턴스를 통해 누설 전류를 일으키고, 이러한 누설전류는 모터의 내구성 및 성능에 영향을 줄 수 있을 뿐만 아니라, 공통 모드 노이즈에도 영향을 줄 수 있다고 알려져 있다<sup>[6]~[8]</sup>. 이와 비슷한 양상으로 인버터에서 발생하는 공통 모드 전도 방출 노이즈도 압축기 케이스와 접지를 통해 흐르게 되고, 이는 공통 모드 전도 방출 노이즈에 많은 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서 압축기의 임피던스 특성이 이러한 공통 모드 노이즈와 어떠한 관계가 있는지에 대해 서로 다른 임피던스를 갖고 있는 두 압축기를 비교하는 시뮬레이션을 통해 알아보고자 한다.

### Ⅲ. 압축기 임피던스 특성과 공통 모드 전도 노이즈 해석을 위한 모델링

#### 3-1 인버터 구동 압축기 시스템의 공통 모드 등가 회로

그림 4는 압축기 임피던스 특성이 공통 모드 노이즈에 어떤 영향을 주는지를 확인하기 위한 등가 회로이다.

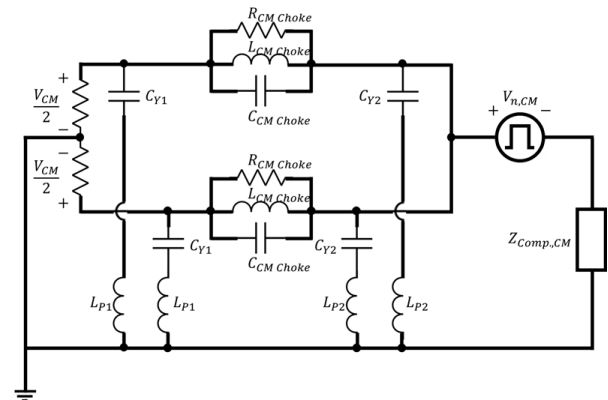


그림 4. 인버터 구동 압축기 시스템의 공통 모드 등가 회로  
Fig. 4. Common-mode equivalent circuit for inverter driven compressor system.

EMI 필터 중 공통 모드와 관련 있는 성분들만 고려하기 위해  $X$  커패시터는 생략을 하였다. 보다 정확한 시뮬레이션을 위해  $Y$  커패시터와 접지 간의 기생 인덕턴스( $L_{P1}$ ,  $L_{P2}$ )와 CM 초크를 등가회로로 나타내었다.  $V_{n,CM}$ 과  $Z_{Comp,CM}$ 은 각각 인버터 공통 모드 노이즈와 압축기 공통 모드 임피던스를 나타낸다. 이 등가 회로 모델에서 LISN에서 측정되는  $V_{CM}$ 과 인버터 공통 모드 노이즈  $V_{n,CM}$ 의 전압비를 통해  $Z_{Comp,CM}$ 이 공통 모드 노이즈에 어떻게 영향을 주는지를 확인할 수 있다.

그림 4의 등가 모델을 통해 압축기 임피던스가 공통 모드 노이즈에 어떻게 영향을 주는지를 확인해보는 시뮬레이션 수행을 위해 몇 가지 측정이 선행되었다.

#### 3-2 압축기 공통 모드 임피던스 측정 및 모델링

모터의 공통 모드 임피던스를 추출하는 방법은 많은 문헌에서 논의되어 왔다. 참고문헌 [9]~참고문헌 [11]에서, 유한 요소 해석(FEA)은 모터의 HF 모델을 얻기 위해 사용되어졌다. 하지만, FEA 기반 방법을 사용하면 해당 모터의 상세한 수치와 재료 특성이 필요하다. 이러한 복잡성 때문에 본 논문에서는 참고문헌 [12]~참고문헌 [14]에서 수행된 것과 같이 직접 측정을 통해 등가 회로 모델을 구성하였다. 회전자의 위치가 변경되어도 공통 모드 임피던스에는 영향이 없기 때문에 임의의 회전자 위치에

서 모터의 공통 모드 임피던스 측정을 하여도 아무 문제가 없다. 즉, 시간에 따른 공통 모드 임피던스의 변화가 없다는 것을 의미한다<sup>[15][16]</sup>.

그림 5는 압축기 공통 모드 임피던스 측정을 위한 모습을 나타내고 있다. 공통 모드 임피던스 측정을 위해서는 3상 단자를 하나로 묶고, 이와 압축기의 외관 접지 간의 임피던스를 측정한다.

그림 6은 본 논문에서 측정에 사용된 서로 다른 제조업체 A와 제조업체 B의 7 kW급 압축기의 사진이다. 압축기 내부는 영구 자석 동기 모터(PMSM) 방식을 적용하고 있다. 두 가지의 압축기의 공통 모드 임피던스를 동일한 방법으로 측정하였고, 측정 장비는 Agilent Technologies사의 E5061B ENA Series Network Analyzer를 이용하였다.

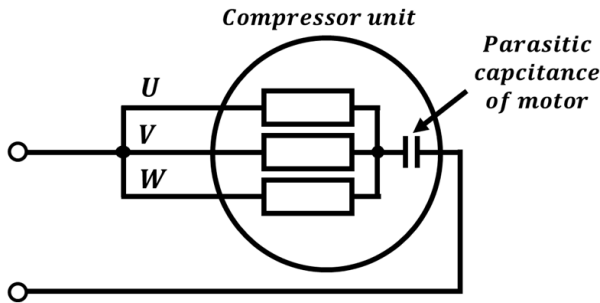


그림 5. 압축기 공통 모드 임피던스의 측정 설정  
Fig. 5. Measurement setup of the compressor CM impedance.

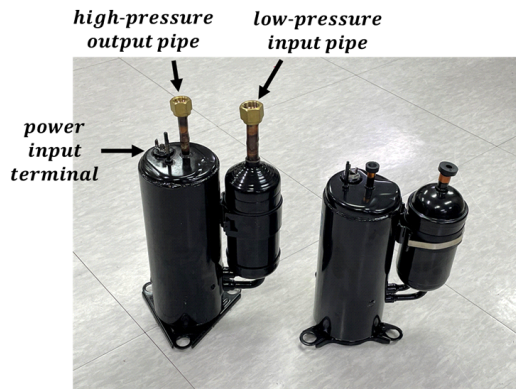


그림 6. 측정에 사용된 두 압축기의 사진  
Fig. 6. Photographs of the two compressors used in the measurement.

$$S_{11} = \Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

$$Z_L = \frac{Z_0(1 + S_{11})}{1 - S_{11}} \quad (2)$$

VNA에서 측정되는  $S_{11}$ 은 식 (1)과 같고, 이를  $Z_L$ 에 대해 정리해서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 이를 통해 압축기의 공통 모드 임피던스를 구할 수 있다.

그림 7은 A와 B 두 제조업체의 압축기 공통 모드 임피던스를 나타낸다. B 제조업체의 압축기 공통 모드 임피던스가 1.5 MHz 주파수 이하의 대역에서 A 제조업체의 압축기 공통 모드 임피던스보다 약 2~3 dB 정도 더 높고, 그 이후 주파수 대역에서는 전반적으로 비슷한 양상을 보였다. 이러한 압축기 임피던스 특성으로 인해 일정 대역에서는 임피던스 차이로 인한 영향이 나타나고, 나머지 대역에서는 큰 차이가 없을 것으로 예상해 볼 수 있다.

### 3.3 압축기 구동 시스템의 필터부 파라미터 추출

그림 4의 등가회로에 표현된 압축기 구동 시스템의 필터부 파라미터를 추출하기 위해서 Ansys 사에서 제공하는 Ansys Q3D Extractor를 사용할 수 있다. 측정에 사용된 두 압축기를 실제로 구동하는 제어기 PCB를 기준으로 Ansys Q3D Extractor를 통해 추출된 각 파라미터를 표 1에 정리하였다.

그림 8은 압축기 구동 제어기 PCB에 적용된 CM 초크

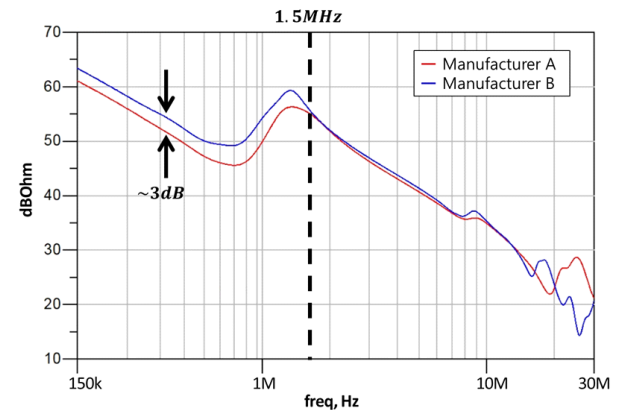


그림 7. 측정된 두 압축기의 공통 모드 임피던스  
Fig. 7. CM impedance measurements of two compressors.

표 1. 압축기 구동 제어기 PCB의 Y 커패시터 및 추출된 기생 성분의 값

Table 1. The values of Y-capacitors and parasitic components extracted from compressor driver PCB.

Parameter	$C_{Y1}$	$C_{Y2}$	$L_{P1}$	$L_{P2}$
Value	3.3 nF	3.3 nF	9 nH	54 nH

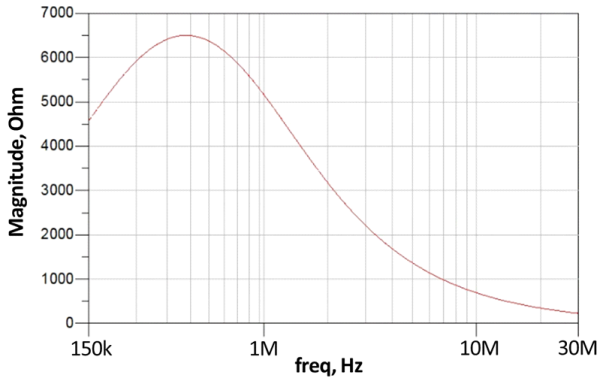


그림 8. 압축기 구동 제어기 PCB에 적용된 CM 초크의 임피던스 특성

Fig. 8. Impedance characteristics of CM choke applied to compressor drive controller PCB.

표 2. 압축기 구동 제어기 PCB의 CM 초크의 등가 회로 파라미터 값

Table 2. The equivalent circuit parameter values of the CM choke in the compressor driver PCB.

Parameter	$R_{CM\_Choke}$	$L_{CM\_Choke}$	$C_{CM\_Choke}$
Value	6.5 kohm	6 mH	23 pF

의 임피던스 특성을 나타낸다. 이로부터 추출한 등가회로 파라미터  $R_{CM\_Choke}$ ,  $L_{CM\_Choke}$ ,  $C_{CM\_Choke}$ 의 값은 표 2에 정리하였다.

#### IV. 시뮬레이션 및 실험을 통한 압축기 임피던스와 공통 모드 전도 방출 노이즈의 관계

##### 4-1 압축기 구동 시스템 시뮬레이션

그림 9는 앞서 III장에서 진행한 일련의 과정들을 통해 압축기 구동 시스템을 완성하고, 제조업체 A와 B 압축기를 비교하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션

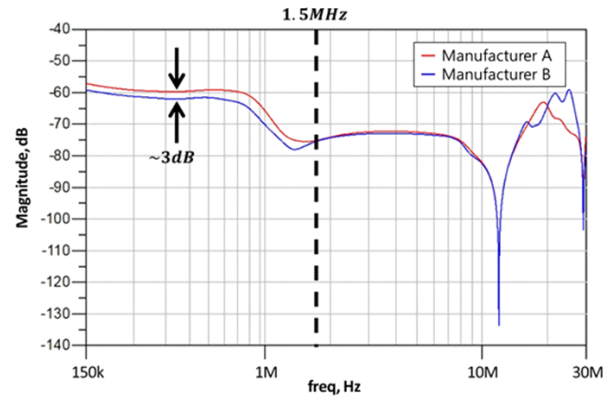


그림 9. 제조업체 A와 B의 압축기 특성을 반영한 그림 4의 등가회로에서의  $V_{LISN}/V_{n,CM}$  그래프

Fig. 9.  $V_{LISN}/V_{n,CM}$  graph in Fig. 4. equivalent circuit with compressor characteristics of manufacturers A and B.

결과 또한 그림 7과 유사하게 1.5 MHz 주파수 이하 대역에서 2~3 dB의 차이를 갖는 것을 확인할 수 있다. 인버터에서 발생한 공통 모드 전압 노이즈( $V_{n,CM}$ )는 압축기의 공통 모드 임피던스( $Z_{Comp,CM}$ )를 거쳐 접지를 통해 LISN으로 흘러 들어가 공통 모드 노이즈( $V_{CM}$ )로 측정되게 되는데, 이 때 더 높은  $Z_{Comp,CM}$ 이 공통 모드 전압으로 인해 발생하는 전류를 제한하기 때문에 LISN에서 측정되는 노이즈도 줄어들게 된다. 따라서 상대적으로 높은  $Z_{Comp,CM}$ 을 갖고 있는 B 제조업체의 압축기가 더 낮은 전압비, 즉 더 큰 노이즈 감쇄를 나타내고 있다는 것을 그림 9로 확인할 수 있다.

##### 4-2 공통 모드 전도 방출 노이즈의 측정

앞서 4-1절에서 진행한 시뮬레이션 결과가 실제 공통 모드 전도 방출 노이즈 측정 결과에서는 어떻게 나타나는지에 대해 실험을 통해 확인해 보았다.

그림 10은 에어컨 실외기의 공통 모드 전도 방출 노이즈를 측정하기 위한 실험 설정을 보여준다. 에어컨 실내기와 실외기가 배관 및 통신선으로 연결되어 있고, 실외기 전원은 LISN에 연결되고, 실내기 전원은 일반 단상 220 V/60 Hz 전원에 연결이 된다. 전도 방출 노이즈의 공통 모드 성분 분리 측정을 위해 EMI ANALYZER가 추가로 세팅되었고, 이를 TEST RECEIVER에 연결하여 공통

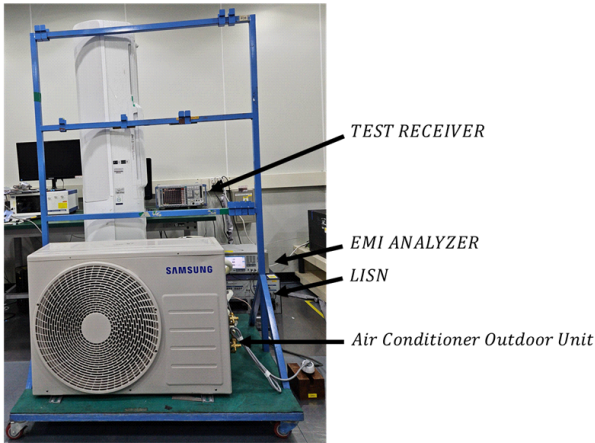


그림 10. 에어컨 실외기의 공통 모드 전도 방출 노이즈 측정을 위한 설정 사진

Fig. 10. The photograph of measurement setup for common mode conduction emission noise of air conditioner outdoor unit.

모드 전도 방출 노이즈를 측정하게 된다. 본 논문에서 진행한 실험에서 에어컨 실외기에는 앞서 언급된 제조업체 A와 B의 압축기가 사용되었으며, LISN과 EMI ANALYZER는 각각 EMCIS사의 LN4-50과 EA-300을 사용하였으며, TEST RECEIVER는 ROHDE&SCHWARZ사의 ESPI-3을 사용하였다.

그림 11은 에어컨 실외기의 공통 모드 전도 방출 노이즈 측정 결과를 보여준다. 범례에 표기된 제조업체 A와 B는 해당하는 색상이 각 제조업체의 압축기가 적용된 에어컨 실외기의 측정 결과라는 것을 의미한다. 위쪽 그래

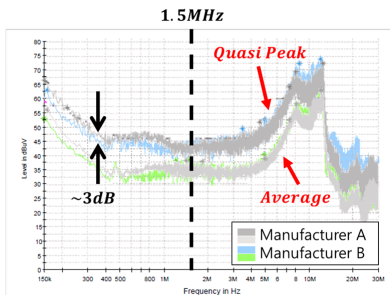


그림 11. 에어컨 실외기의 공통 모드 전도 방출 노이즈 측정 결과

Fig. 11. The result of measurement of common mode conduction emission noise of air conditioner outdoor unit.

프는 Quasi Peak 값을, 아래쪽 그래프는 Average 값을 나타낸다. 측정 결과는 앞서 4-1절에서 수행한 시뮬레이션의 결과와 유사하다. 1.5 MHz 주파수 대역 이하에서 약 2~3 dB의 차이를 보이며, 그림 7의 압축기 공통 모드 임피던스의 차이만큼 측정된 공통 모드 전도 방출 노이즈의 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 이는 수행한 시뮬레이션의 신뢰도가 상당히 높음을 의미하며, 상대적으로 압축기의 공통 모드 임피던스가 높으면, 공통 모드 전도 방출 노이즈 저감 측면에서 유리하다는 것을 알 수 있다.

이러한 상관관계를 통해 압축기의 임피던스에 대해 분석해보는 것은 의미가 있다. 압축기 내부에 적용되는 영구 자석 동기 모터(PMSM)의 등가 회로를 분석을 통해 이를 알아보도록 한다.

그림 12는 영구 자석 동기 모터(PMSM)의 등가 회로를 나타낸다. 저항, 인덕턴스 및 커패시턴스와 같은 여러 집중 매개 변수로 구성된 이 회로는 고주파 작동에서 발생하는 다양한 물리적 현상을 고려하고 있다.  $R_{g1}$ ,  $C_{g1}$ 은 각상의 입력단과 접지 간의 등가 저항 및 기생 커패시턴스이고, 반면에  $R_{g2}$ ,  $C_{g2}$ 는 중성점과 접지 간의 등가 저항 및 기생 커패시턴스를 나타낸다.  $R_e$ 는 고주파 자기 손실을 의미하고,  $R_{cu}$ ,  $L_d$ 는 권선 저항 및 인덕턴스를 나타내며,  $R_t$ ,  $L_t$ ,  $C_t$ 는 고정자 내 권선 간의 상호 작용을 내포하고 있다<sup>[17]</sup>. 그리고  $L_c$ 는 영구 자석 동기 모터 입력부 기생 인덕턴스를 의미한다<sup>[18]</sup>. 이러한 파라미터들은 참고문헌 [18]에서 제안한 방법에 따라 계산이 가능하다.

그림 13은 두 압축기의 공통 모드 및 차동 모드 임피던스 측정값을 나타낸다. 참고문헌 [18]에서 제안한 방법과

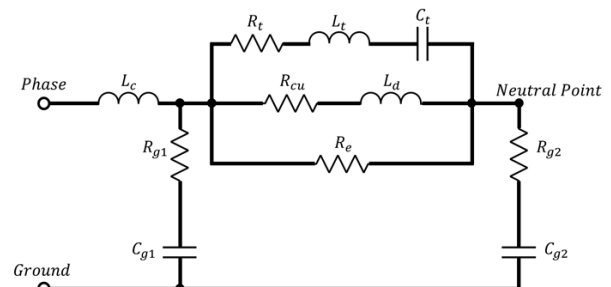
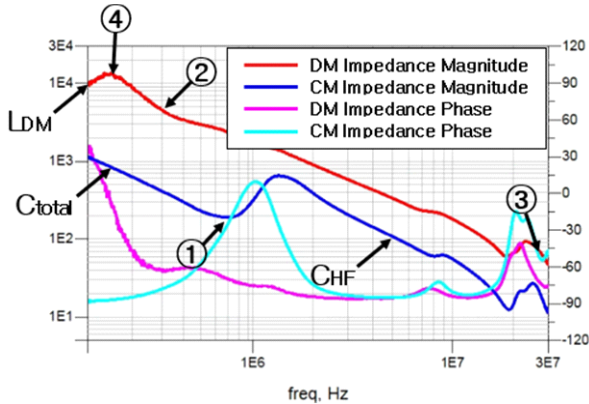
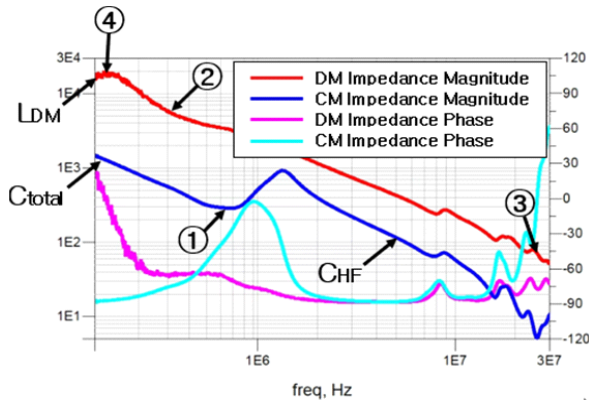


그림 12. 영구 자석 동기 모터(PMSM)의 등가 회로

Fig. 12. The equivalent circuit of permanent magnet synchronous motor (PMSM).



(a) 제조업체 A  
(a) Manufacturer A



(b) 제조업체 B  
(b) Manufacturer B

그림 13. 제조업체 A와 B 압축기의 공통 모드(CM) 및 차동 모드(DM) 임피던스 특성 곡선  
Fig. 13. Common mode (CM) and differential mode (DM) impedance characteristic curves for compressors of manufacturer A and B.

동일한 방식으로 파라미터 추출을 위한 특징점 7개를 표시하고 계산하였고, 표 3과 같이 계산된 두 압축기 등가 회로의 파라미터를 나타내었다. 각 파라미터를 비교해 보면  $C_{g2}$ 가 가장 큰 차이를 보였고, 나머지 차이가 큰 파라미터들은 공통 모드 임피던스와 관련이 없거나,  $C_{g2}$ 에 의해 계산되는 파라미터이므로 두 압축기 공통 모드 임피던스의 차이는 결국  $C_{g2}$ 에 지배적이라는 것을 알 수 있다.

그림 14는  $C_{g2}$ 가 20 %씩 감소함에 따라 증가하는 공통 모드 임피던스 특성을 나타낸다. 이를 통해 저주파수 대

표 3. 제조업체 A와 B 압축기 등가 회로의 파라미터 값  
Table 3. The equivalent circuit parameter values of compressors of manufacturer A and B.

	Manufacturer A	Manufacturer B
Parameter	Value	Value
$R_{g1}$	55.2533 $\Omega$	48.242 $\Omega$
$R_{g2}$	569.427 $\Omega$	861.585 $\Omega$
$C_{g1}$	97.384 pF	86.939 pF
$C_{g2}$	215.49 pF	152.02 pF
$R_e$	8,986.7 $\Omega$	13,447 $\Omega$
$R_{cu}$	0.015 $\Omega$	0.015 $\Omega$
$L_s$	69.993 $\mu$ H	102.78 $\mu$ H
$L_c$	399.07 nH	437.71 nH
$R_t$	1.686 k $\Omega$	2.578 k $\Omega$
$L_t$	744.21 $\mu$ H	1200 $\mu$ H
$C_t$	31.288 pF	23.896 pF

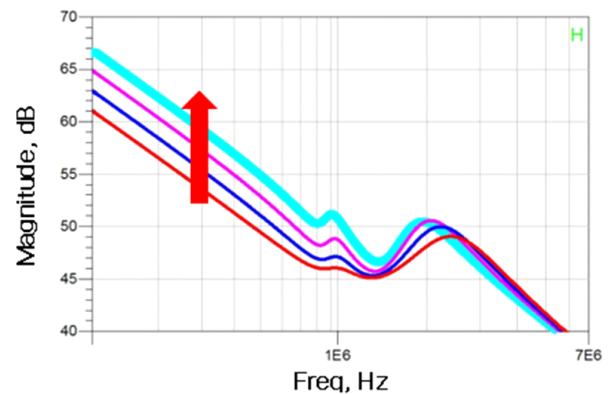


그림 14.  $C_{g2}$ 가 20 %씩 감소함에 따라 변하는 공통 모드 임피던스 특성 곡선

Fig. 14. Common mode impedance characteristic curve that changes as  $C_{g2}$  decreases by 20 %.

역, 특히 공통 모드 임피던스의 첫 번째 공진 주파수 이하 대역에서 낮은  $C_{g2}$ 는 더 큰 공통 모드 임피던스를 만든다는 것을 알 수 있고, 최종적으로는 공통 모드 노이즈를 더 많이 감쇄할 것으로 예상해볼 수 있다.

## V. 결 론

본 연구에서는 에어컨 실외기 시스템에서 압축기의 임

피턴스가 공통 모드 전도 방출 노이즈에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 연구 결과, 압축기 임피던스는 에어컨 실외기 시스템의 주요 노이즈원인 인버터에서 발생하는 공통 모드 노이즈의 전파 경로에서 중요한 역할을 한다는 것이 확인되었다. 이는 등가회로 모델링 및 그 시뮬레이션, 그리고 실제 측정을 통해 뒷받침되었으며, 압축기 설계 시 이러한 임피던스의 조절이 전자기 호환성 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

본 연구의 결과는 에어컨 시스템의 전자기적 설계 최적화에 새로운 정보를 제공한다. 특히, 압축기 임피던스를 조절하여 공통 모드 노이즈를 감소시키는 방법은 에너지 효율성을 높이는 동시에 전자기적 간섭 문제를 줄일 수 있는 효과적인 접근법으로 제시될 수 있다.

향후 연구에서는 압축기 임피던스를 구성하는 물리적인 파라미터와 압축기 성능 및 설계 비용 등 다양한 상관관계에 대해 더욱 자세히 연구함으로써 보다 범용적인 압축기 설계 방향을 제시할 수 있을 것이다.

결론적으로, 압축기 임피던스가 공통 모드 전도 방출 노이즈에 미치는 영향을 이해하는 것은 에어컨 실외기 시스템의 전자기 호환성을 개선하는 데 중요하다. 이 연구는 해당 분야에서의 이해를 심화시키고, 향후 설계 개선에 기여할 수 있는 기초적인 토대를 마련하였다.

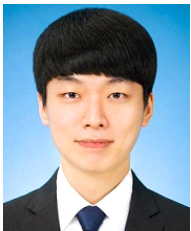
## References

- [1] S. Ogasawara, H. Akagi, "Modeling and damping of high-frequency leakage currents in PWM inverter-fed AC motor drive systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, no. 5, pp. 1105-1114, Sep.-Oct. 1996.
- [2] I. Takahashi, A. Ogata, "Active compensation circuit of leakage current in PWM inverter fed AC motor drive system," in *Proceedings of the Joint Conference of Hokuriku Chapters IW*, Hokuriku, 1996, p. 41.
- [3] Y. Koyama, M. Tanaka, and H. Akagi, "Modeling and analysis for simulation of common-mode noises produced by an inverter-driven air conditioner," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 5, pp. 2166-2174, Sep.-Oct. 2011.
- [4] M. Chen, X. Sun, and L. Huang, "Conducted EMI analysis of a three-phase inverter-motor system in a variable frequency air conditioner," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, Nov. 2010, pp. 805-810.
- [5] F. Peng, C. Hu, D. Xu, H. Wang, and W. Zhong, "EMI model of air-conditioning outdoor machines," in *2022 International Power Electronics Conference(IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia)*, Himeji, May 2022, pp. 2535-2539.
- [6] D. Han, C. T. Morris, W. Lee, and B. Sarlioglu, "Comparison between output CM chokes for SiC drive operating at 20-and 200-kHz switching frequencies," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 2178-2188, Feb. 2017.
- [7] T. M. Jahns, H. Dai, "The past present and future of power electronics integration technology in motor drives," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, no. 3, pp. 197-216, Sep. 2017.
- [8] K. Tagami, S. Ogasawara, "Influence of high-frequency leakage current on motor position control in PWM inverter-fed servo drives," in *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, Sep. 2011, pp. 2153-2159.
- [9] J. Benecke, "Impedance and emission optimization of low-voltage DC motors for EMC compliance," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 3833-3839, Sep. 2011.
- [10] K. Maki, H. Funato, and L. Shao, "Motor modeling for EMC simulation by 3-D electromagnetic field analysis," in *2009 IEEE International Electric Machines Drives Conference*, Miami, FL, May 2009, pp. 103-108.
- [11] O. A. Mohammed, S. Ganu, N. Abed, S. Liu, and Z. Liu, "High frequency PM synchronous motor model determined by FE analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 4, pp. 1291-1294, Apr. 2006.
- [12] B. Mirafzal, G. L. Skibinski, R. M. Tallam, D. W. Schlegel, and R. A. Lukaszewski, "Universal induction motor model with low-to-high frequency-response char-

- acteristics," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 5, pp. 1233-1246, Sep.-Oct. 2007.
- [13] G. Vidmar, D. Miljavec, "A universal high-frequency three-phase electric-motor model suitable for the delta- and star-winding connections," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 8, pp. 4365-4376, Aug. 2015.
- [14] D. Zhang, L. Kong, and X. Wen, "High frequency model of interior permanent magnet motor for EMI analysis," in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific(ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, Aug. 2014, pp. 1-6.
- [15] I. Stevanovi, B. Wunsch, and S. Skibin, "Behavioral high-frequency modeling of electrical motors," in *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Long Beach, CA, Mar. 2013, pp. 2547-2550.
- [16] H. Zhao, S. Wang, J. Min, and Y. Zhi, "Systematic modeling for a three phase inverter with motor and long cable using optimization method," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE)*, Milwaukee, WI, Sep. 2016, pp. 1-8.
- [17] G. Almandoz, S. Zarate, A. Egea, Y. Moreno, A. Urdangarin, and R. Moreno, "High frequency modeling of electric drives for electromagnetic compatibility analysis," in *2020 International Conference on Electrical Machines(ICEM)*, Gothenburg, Aug. 2020, pp. 1129-1135.
- [18] M. S. Toulabi, L. Wang, L. Bieber, S. Filizadeh, and J. Jatskevich, "A universal high-frequency induction machine model and characterization method for arbitrary stator winding connections," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1164-1177, Sep. 2019.

정 상 원 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-8331-0568>



2018년 2월: 한양대학교 전기공학과 (공학사)  
2018년 1월~현재: 삼성전자 재직  
2023년 3월~현재: 성균관대학교 DMC 공학과 석사과정  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

한 준 희 [성균관대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-7759-6717>



2018년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학사)  
2018년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석·박사통합과정  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

김 인 섭 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0008-6147-2040>



2022년 2월: 공주대학교 나노정보공학과 (공학사)  
2023년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

나 완 수 [성균관대학교/전임교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0315-3294>



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)  
1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator  
1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원  
1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC