

Research on Vibration Reduction in Induction Motors with Concentric Winding Configuration

Yun-Jae Won, Byeong-Cheol Bae, and Myung-Seop Lim*

Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence), Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 3 December 2024, Received in final form 20 December 2024, Accepted 23 December 2024)

This article proposes the application of an optimal concentric winding configuration to reduce the vibration of an induction motors (IMs). First, the causes of vibration in IMs were investigated and the structural features, advantages and disadvantages of the commonly used lap winding configuration and concentric winding configuration were described. Furthermore, the characteristics were analytically compared by adjusting the turns ratio of the coils while maintaining the number of turns per slot in concentric winding. Thus, the optimal concentric winding configuration for vibration reduction was determined. To verify the vibration reduction effect of concentric winding, 2-D finite element analysis (FEA) was performed on the 37 kW IMs with both conventional lap winding and the proposed concentric winding. Finally, the vibration reduction effect of the proposed concentric winding on the IM was demonstrated through a comparison of electromagnetic performance and vibration characteristics according to winding configuration.

Keywords : induction motors (IMs), concentric winding, winding factor, electromagnetic force, vibration

유도 모터의 동심권 배치에 따른 진동 저감 연구

원윤재 · 배병철 · 임명섭*

한양대학교 미래자동차공학과(미래자동차-SW융합전공), 서울시 왕십리로 222, 04763

(2024년 12월 3일 받음, 2024년 12월 20일 최종수정본 받음, 2024년 12월 23일 게재확정)

본 논문은 유도 모터의 진동을 저감하기 위한 최적의 동심 권선 구성 적용방법을 제안한다. 우선 유도 모터의 진동 발생 원인을 규명하고 일반적으로 사용되는 중권 배치와 동심권 배치의 구조적 특징과 장단점을 설명했다. 또한, 동심권의 슬롯당 턴 수를 유지하면서 코일의 턴 비율을 조절함에 따라 특성이 어떻게 바뀌는지 비교하였다. 이를 통해 진동 저감을 위한 최적의 동심권 배치가 결정되었다. 동심권의 진동 저감 효과를 검증하기 위해 기존의 중권과 제안된 동심권이 각각 적용된 37 kW급 유도 모터에 대해 2차원 유한요소해석을 수행했다. 마지막으로 권선 배치에 따른 전자기 성능 및 진동 특성 비교를 통해 유도 모터의 제안된 동심권 배치에 진동 저감 효과를 검증하였다.

주제어 : 유도 모터, 동심권, 권선 계수, 전자기력, 진동

I. 서 론

유도 모터(Induction Motor, IM)는 내구성, 제작성, 제어의 용이성과 더불어 회로류 영구자석을 사용하지 않아 수급의 불안정성이 없고 경제적인 가격으로 인해 산업용 분야에서 널리 사용되고 있다[1-3]. 이에 따라 유도 모터의 고효율화 뿐만 아니라 진동 및 소음을 개선하기위한 연구가 활발히 진행

되고 있다[4-6]. 특히, 진동 및 소음은 기계적 성능과 수명에 악영향을 미칠 수 있다. 유도 모터의 진동 원인은 크게 기계적 불균형, 공기역학적 영향, 전자기력의 세 가지 주요 원인으로 분류할 수 있다. 여기서 전자기력은 고정자와 회전자의 자기장 간에 상호 작용에서 비롯되며 모터의 진동 특성에 큰 영향을 끼친다. 지속 밀도가 공극 내에서 균일하지 않거나 고조파가 포함되어 있으면 비정상적인 전자기력이 발생한다. 또한 유도 모터에서 고정자와 회전자의 슬롯 구조가 지속 밀도를 불균일하게 분포시키고 이는 시간 및 공간적으로 변화하는 전자기력을 생성한다. 그에 따라 슬롯 조합 별 이중 스류

구조를 회전자에 적용하여 홀수 차 방사 방향 전자기력을 제거하고 짝수 차 방사 방향 전자기력을 약화시켜서 전자기 소음을 저감하였다[4]. 또한, 회전자 슬롯 퍼미언스 고조파를 통해 야기되는 진동 및 소음을 저감하기 위해 회전자에 노치 형상을 적용하여 방사 방향 전자기력의 최저 공간 차수에 의해 야기되는 진동의 크기를 저감했다[5]. 하지만, 회전자에 스쿼와 노치를 적용하는 것은 회전자의 구조적 강도를 약화시켜 고속 운전 시 변형이나 손상을 야기할 수 있고, 생산 공정이 복잡해짐에 따라 제작 비용이 증가한다. Rahmani et al.[6]에서는 고정자 권선 피치가 변화함에 따라 유도 모터의 진동 및 소음 특성을 비교하였고, 특정 극 슬롯 조합에 대해 토크 리플, 방사 방향 전자기력 그리고 진동 및 소음을 저감시키는 최상의 권선 피치를 선정하였다. 하지만, 중권을 사용하여 권선 계수의 자유도가 떨어지고 다른 최적의 권선법이 존재할 가능성이 있다.

따라서, 본 논문에서는 고정자와 회전자의 형상은 변화시키지 않고 서로 다른 피치로 구성된 코일의 턴 수를 조절하여 다양한 권선 계수 조합을 만들 수 있는 동심권을 적용하여 유도 모터의 진동 특성을 저감한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 유도 모터 진동의 전자기적 원인에 대한 분석이 진행된다. 3장에서는 중권과 동심권에 대해 설명하고 최적의 동심 권선 구성 방법이 제시되었다. 4장에서는 유한요소해석을 통해 동심권 적용에 의한 유도 모터의 진동 저감 효과를 비교 분석하여 검증되었다. 마지막으로 5장에서는 중권과 동심권의 비교 결과를 기반으로 연구 결론에 대해 설명되었다.

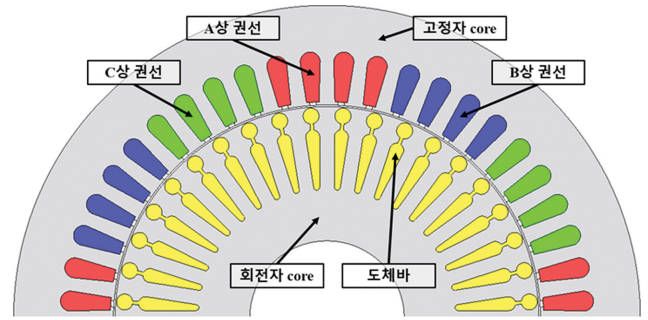


Fig. 1. (Color online) 대상 모델 형상.

II. 유도 모터 진동의 전자기적 원인

본 장에서 진동 특성에 직접적인 영향을 끼치는 방사 방향 전자기력에 초점을 맞춰 분석이 진행된다. 이를 분석하기 위해 수식적으로 공극 자속 밀도와 방사 방향 전자기력을 모델링하여 전자기력의 각 차수 별 원인을 규명한다. 우선, 공극 자속 밀도를 모델링 하기 위해 전기자 및 계자에 의한 자기장을 모델링 된다. 그리고 고정자 치에 작용하는 방사 방향 전자기력을 분석하기 위해 모델링된 공극 자속 밀도를 Maxwell stress tensor 식을 이용하여 방사 방향 전자기력이 계산된다. 마지막으로, 계산된 방사 방향 전자기력을 시간 및 공간 차수에 따라 분석이 진행되고 이를 확인하기 위해 대상 모델에 2-D 과도 해석이 수행된다. 이때 초기 과도 상태의 충분한 수렴을 위해 슬립 주파수 기준 3주기 해석을 진행한다. 수렴된 공극 자속 밀도 기준으로 전자기력을 계

Table I. 대상 모델의 설계 사양.

항목		단위	값	비고
극 / 슬롯 / 도체바 수		-	4 / 48 / 40	
전기적 입력	DC link 전압	V _{dc}	540.0	
	최대 출력	kW	37.0	
기계적 출력	정격 토크	Nm	197.0	
	정격 속도	rpm	1,788.0	
형상 정보	공극 길이	mm	0.9	
	고정자 외경	mm	345.0	
	회전자 외경	mm	233.2	
	적층 길이	mm	290	
Core 재질		-	50PN470	
코일	슬롯 당 턴수	-	17	병렬 회로 수: 2
	점적률	%	82.2	
	상 저항	mΩ	36.0	75 °C 기준
도체바	도체바 재질	-	알루미늄	
	도체바 비저항	Ωm	2.655×10^{-8}	상온 기준
	도체바 충진율	%	90.0	

산하여 진동 특성에 영향이 큰 차수를 분석한다. 대상 모델의 형상과 사양은 Fig. 1과 Table I에 제시되었다.

1. 공극 자속 밀도

공극 자속 밀도는 고정자와 회전자 사이의 공극에서 형성되는 단위 면적 당 자속을 의미한다. 공극 자속 밀도의 시간, 공간에 따른 분포는 방사 방향 전자기력의 크기와 시간, 공간에 따른 분포를 결정하는 주요 요인이다. 공극 자속 밀도가 불균일하면 방사 방향 전자기력이 비정상적으로 불균일하게 되고 이는 기계적 진동과 소음을 유발한다. 특히, 고조파 성분이 많을수록 방사 방향 전자기력의 변동성이 심화되어 모터의 성능과 안정성이 저하된다. 공극 자속 밀도는 전기자 및 계자에 의한 자기장으로 구성되어 있다. 평활 철심을 가정하여 내전형 유도 모터 기준 전기자 및 계자에 의한 방사 방향 자속 밀도는 각각은 수식적으로 다음과 같이 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{1r}(\alpha, t) = \sum_n \sum_v B_{nv} \cos(n\omega t - vp\alpha) \quad (1)$$

$$B_{2r}(\alpha, t) = \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\omega_{\mu}t - \mu p\alpha + \phi_{\mu}) \quad (2)$$

여기서 B_{1r} , B_{2r} 은 각각 전기자 및 계자에 의한 방사 방향 공극 자속 밀도, B_{nv} , $B_{m\mu}$ 는 각각 v 차 전기자 및 μ 차 계자 자속 밀도 크기, α 는 기계각, t 는 시간, n 은 전기자 기자력의 시간 고조파 차수, ω 는 전원 주파수의 전기 각속도, p 는 극 쌍수, ϕ_{μ} 는 전기자 및 계자 기자력의 μ 차 고조파의 위상 차, v 는 전기자 기자력의 공간 고조파 차수로 다음과 같이 표현된다.

$$v = 2m_1k + 1 \quad (3)$$

여기서 m_1 은 고정자 상 수, k 는 정수이다. 그리고 μ 는 계자 기자력의 공간 고조파 차수로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu = k \frac{S_2}{p} + 1 \quad (4)$$

여기서 S_2 는 회전자 슬롯 수이다. 마지막으로 ω_{μ} 는 μ 차 계자 기자력의 전기 각속도로 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_{\mu} = \omega \left[1 + k \frac{S_2}{p} (1 - s) \right] = \omega [\mu(1 - s) + s] \quad (5)$$

여기서 s 는 슬립이다. 또한, 공극 자속 밀도에 슬롯 효과를 반영하기 위해 전기자 및 계자 슬롯에 의한 각각의 비 퍼미언스 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda_{g1}(\alpha) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(kS_1\alpha) \quad (6)$$

$$\lambda_{g2}(\alpha, t) = 1 + \sum_{l=1}^{\infty} A_l \cos[lS_2(\alpha - \omega_m t)] \quad (7)$$

여기서 λ_{g1} , λ_{g2} 는 각각 전기자 및 계자 슬롯에 의한 비 퍼미언스, A_k , A_l 은 각각 k 차 전기자 및 l 차 계자 슬롯에 의한 비 퍼미언스 크기, S_1 은 고정자 슬롯 수, l 은 정수, ω_m 은 회전자의 기계적 각속도이다. 결과적으로 고정자, 회전자의 슬롯 효과를 반영한 공극 퍼미언스는 전기자 및 계자 슬롯에 의한 비 퍼미언스의 곱으로 다음과 같이 근사화 된다.

$$\lambda_g(\alpha, t) \approx 1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(kS_1\alpha) + \sum_{l=1}^{\infty} A_l \cos[lS_2(\alpha - \omega_m t)] \quad (8)$$

여기서 λ_g 는 슬롯 효과를 반영한 공극 퍼미언스이다. 결과적으로 방사 방향 공극 자속 밀도는 방사 방향 전기자 및 계자 자속 밀도로 구성되어 있고 슬롯 효과를 반영하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_{gr}(\alpha, t) = [B_{1r}(\alpha, t) + B_{2r}(\alpha, t)]\lambda_g(\alpha, t) \quad (9)$$

여기서 B_{gr} 은 방사 방향 공극 자속 밀도이다. 이를 통해 고정자 및 회전자의 슬롯 효과를 고려하여 방사 방향 공극 자속 밀도를 수학적으로 표현하여 시간 및 공간 차수를 분석할 수 있다.

2. 방사 방향 전자기력

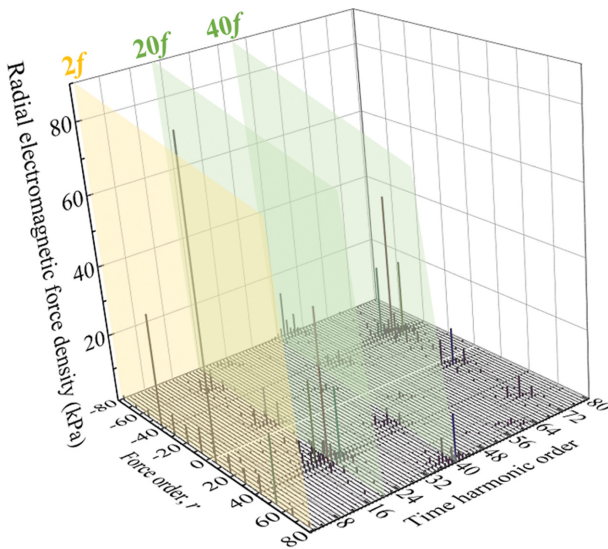
앞서 모델링된 방사 방향 공극 자속 밀도 수식을 통해 상대적으로 작은 접선 방향 공극 자속 밀도를 무시하여 Maxwell stress tensor 식을 이용해 다음과 같이 방사 방향 전자기력을 계산할 수 있다.

$$P_r(\alpha, t) \approx \frac{B_{gr}^2(\alpha, t)}{2\mu_0} \quad (10)$$

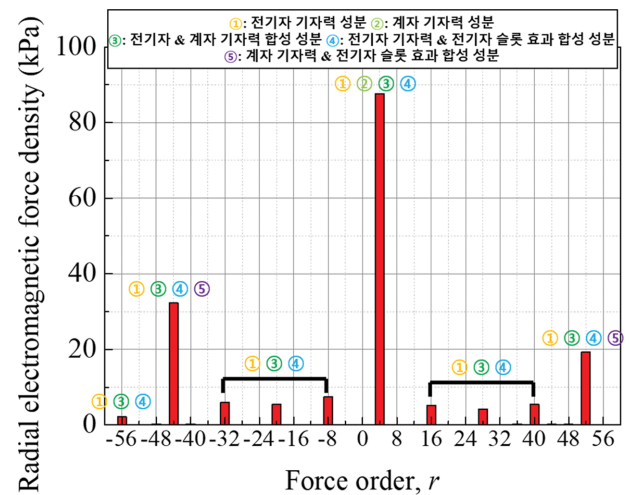
여기서 P_r 은 방사 방향 전자기력, μ_0 는 진공 투자율이다. (1), (2), (8), (9)를 (10)에 대입하여 방사 방향 전자기력의 각 성분 별 시간 및 공간 차수를 Table II에 보이는 것처럼 계산할 수 있다. 이때, 전기자 및 계자의 슬롯 효과의 제공 항은 매우 작다고 가정하여 생략하였다. Table II는 유도 모터의 소스에 따른 전자기력의 시간 및 공간 차수를 나타낸다. 여기서 r 은 전자기력의 공간 차수, j 는 전원 주파수, f_{μ} 는 μ 차 계자 기자력의 전기 주파수, f 은 r 차 힘이 분포될 때 전기 주파수이다. Fig. 1에 나타난 대상 모델의 전자기력의 시간 및 공간 차수를 분석하기 위해 2-D 과도 해석이 수행되었다. 충분한 수렴을 위해 슬립 주파수 기준 3주

Table II. 유도 모터의 전자기 응력의 소스, 공간 차수 및 주파수.

소스	공간 차수	주파수
전기자 기자력 성분	$r = p(v_1 \pm v_2)$	$f_r = (n_1 \pm n_2)f$
계자 기자력 성분	$r = p(\mu_1 \pm \mu_2)$	$f_r = f_{\mu 1} \pm f_{\mu 2}$
전기자 및 계자 기자력 합성 성분	$r = p(v \pm \mu)$	$f_r = \{n \pm [\mu(1 - s) + s]\}f$
전기자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분	$r = p(v_1 \pm v_2) \pm kS_1$	$f_r = (n_1 \pm n_2)f$
계자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분	$r = p(\mu_1 \pm \mu_2) \pm kS_1$	$f_r = f_{\mu 1} \pm f_{\mu 2}$
전기자, 계자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분	$r = p(v \pm \mu) \pm kS_1$	$f_r = \{n \pm [\mu(1 - s) + s]\}f$
전기자 기자력 및 계자 슬롯 효과의 합성 성분	$r = p(v_1 \pm v_2) \pm lS_2$	$f_r = (n_1 \pm n_2 \pm lS_2/p)f$
계자 기자력 및 계자 슬롯 효과의 합성 성분	$r = p(\mu_1 \pm \mu_2) \pm lS_2$	$f_r = f_{\mu 1} \pm f_{\mu 2} \pm (lS_2/p)f$
전기자, 계자 기자력 및 계자 슬롯 효과의 합성 성분	$r = p(v \pm \mu) \pm lS_2$	$f_r = \{n \pm [\mu(1 - s) + s]\}f \pm (lS_2/p)f$

**Fig. 2.** (Color online) 정격 부하 시 방사 방향 전자기 응력 2-D FFT 결과.

기 해석을 진행하였다. 해석 조건으로 3상 정현파 전류($n = 1$) 기준으로 Table II에 제시된 정격 부하에서 진행하였고 이를 위해 상전류 $70A_{rms}$, 슬립 주파수 0.4 Hz 가 인가되었다. 이때 도체바와 코일의 해석 온도는 50°C 로 진행하였다. 계산된 수렴된 구간의 전원 주파수 기준 1주기의 방사 방향 공극 자속 밀도를 통해 (10)식을 이용하여 전자기 응력을 계산하였다. 이때 접선 방향 공극 자속 밀도가 방사 방향 공극 자속 밀도 대비 rms 값 기준 10% 이하임을 확인하였고 (10)식의 가정이 합당한 것을 확인하였다. 전자기 응력의 시간 및 공간 차수 별 분석을 위해 2-D 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)를 수행하였다. Fig. 2에 보이는 것처럼 시간 및 공간 차수에 따른 방사 방향 전자기 응력의 크기가 시간 주파수 20차의 배수 차수 성분기준으로 주변 시간 차수에서 전자기 응력의 크기가 존재한다. 이는 계자 기자력의 영향으로 슬립 항 때문에 발생하는 고조파 성분이다. Fig. 3에 보이는 것처럼 전자기 응력의 기본파는 시간 2차에서 나타나고 가장 큰 전자기력 성분이 존재한다. 시간 2차 기준에서 Table

**Fig. 3.** (Color online) 시간 2차 기준 공간 차수 별 전자기 응력 크기.

II에 나타난 성분 중 전기자 기자력 성분, 계자 기자력 성분, 전기자 및 계자 기자력 합성 성분, 계자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분, 그리고 전기자, 계자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분 총 5개의 성분이 존재한다. 이 중 전기자 기자력 성분, 전기자 및 계자 기자력 합성 성분 그리고 전기자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분은 모든 공간 차수에 존재하고, 계자 기자력 및 전기자 슬롯 효과의 합성 성분은 공간 $-44, 52$ 차에 존재한다. 마지막으로 계자 기자력 성분은 공간 4차에만 존재한다. 따라서, 진동 특성을 향상시키기 위해 전자기 응력 모든 공간 차수에 영향을 끼치는 전기자 기자력 성분의 고조파를 저감 방법으로 다른 권선법이 제안된다.

III. 중권 및 동심권

분포권의 경우 권선의 배치 방법에 따라 중권(Lap winding)과 동심권(Concentric winding)으로 분류된다. 각 방법에 따라 분포 계수와 단절 계수를 조절하여 권선 계수를 변화시킬

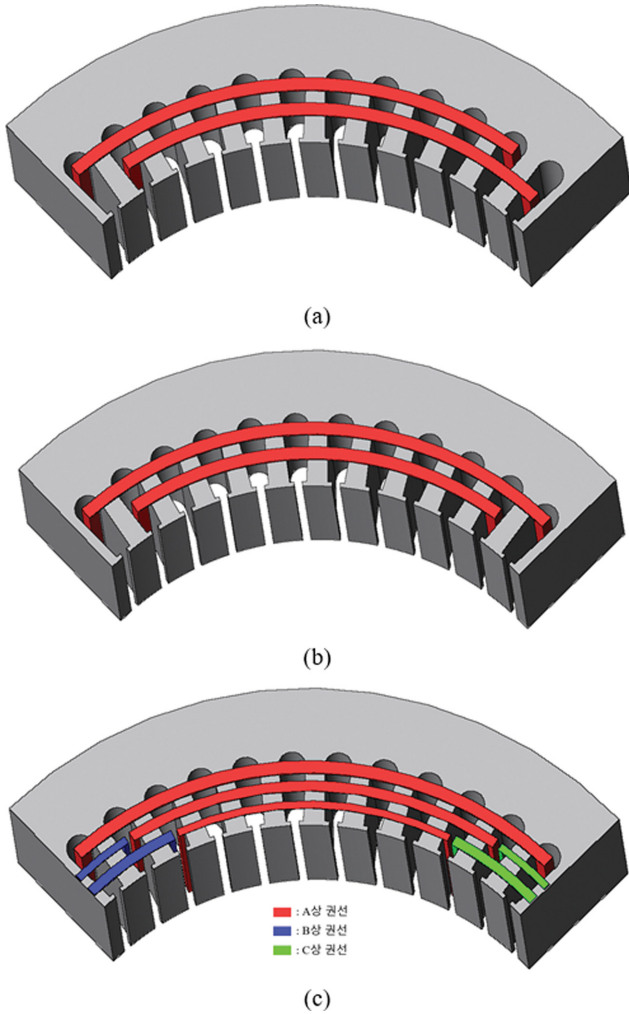


Fig. 4. (Color online) 권선 방법에 따른 대상 모델의 권선 배치 (a) 중권, (b) 단층 동심권, (c) 혼합층 동심권.

수 있다. 본 장에서는 대상 모델의 권선 배치에 대해 설명하고 전기자 기자력의 고조파를 저감하기 위해 권선 계수를 변화시킨다. 비교적 자유도가 높게 권선 계수를 변화시키기 위해 동심권을 사용하고 이때 최적의 권선 배치를 선정한다.

1. 중권

중권은 같은 피치를 갖는 코일이 배치되는 권선법이다. 이때 코일의 턴 수는 각각 동일하게 유지해야한다. Fig. 4(a)는 중권 기준 A상 권선 배치를 보여준다. 이와 같은 방식으로 기존의 대상 모델의 고정자 권선이 배치되어있다. 고조파 권선 계수를 저감하기 위해서 코일 피치를 슬롯 피치 단위로 당겨서 단절 계수를 저감 시켜야 한다. 이때, 분포 계수는 유지한 채 단절 계수를 줄여서 권선 계수를 줄일 수 있다. 다음은 분포 계수와 단절 계수의 계산 식이다.

Table III. 대상 모델 기준 코일 피치에 따른 k 차 권선 계수.

고조파 차수	전절권 (12 피치)	단절권 (11 피치)	단절권 (10 피치)
1 st	0.958	0.949	0.925
5 th	0.205	0.163	0.053
7 th	0.158	0.096	-0.041
11 th	0.126	0.016	-0.122
13 th	0.126	-0.016	-0.122
17 th	0.158	-0.096	-0.041
19 th	0.205	-0.163	0.053
23 rd	0.958	-0.949	0.925
25 th	-0.958	0.949	-0.925

$$k_{dk} = \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{2m_1}\right)}{q \sin\left(\frac{k\pi}{2m_1 q}\right)} \quad (11)$$

$$k_{pk} = \sin\left(\frac{k\pi\beta}{2}\right) \quad (12)$$

여기서 k_{dk} 는 k 차의 분포 계수, k_{pk} 는 k 차의 단절 계수, q 는 매극 매상 당 고정자 슬롯 수, 그리고 β 는 코일 피치와 극 피치의 비율이다. $\beta = 1$ 일 경우 코일 피치와 극 피치가 동일하고 이를 전절권(Full pitch winding)이라 말한다. 또한, 코일 피치가 극 피치보다 작아질 경우 이를 단절권(Short pitch winding)이라 말한다. 이때 코일 피치는 고정자 슬롯 구조 상 슬롯 피치 단위로 줄일 수 있고 고정자 슬롯 수가 정해지면 단절 계수의 자유도가 떨어지게 된다. 다음은 분포 계수와 단절 계수를 통해 권선 계수를 계산하는 식이다.

$$k_{wk} = k_{dk} \times k_{pk} \quad (13)$$

여기서 k_{wk} 는 k 차의 권선 계수를 의미한다. 이를 통해 대상 모델의 극, 슬롯 수 기준으로 Table III과 같이 코일 피치에 따른 권선 계수를 계산할 수 있다. 극과 고정자 슬롯 수의 조합에 따라 비교적 제한적인 권선 계수를 갖는 것을 확인할 수 있다.

2. 동심권

동심권은 동일한 코일 중심을 갖고 각각 다른 피치로 배치되는 권선법이다. 이때 슬롯 당 턴 수를 유지한 채로 각 코일의 턴 수를 다르게 배치할 수 있다. Fig. 4(b)는 단층(Single layer) 동심권 기준 A상 권선 배치를 보여준다. 이와 같이 권선이 배치될 경우 전절권과 같은 권선 계수를 갖고 엔드턴 효과를 무시한다면 같은 해석 결과를 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 권선 계수의 자유도를 얻기 위해 Fig. 4(c)와 같은 권선 배치 방법을 이용한다. 이는 단층과 이중(Double layer)이 동시에 사용된 혼합층(Mixed layer) 동심권이다. 해

Table IV. 대상 모델 기준 코일의 턴 비율에 따른 k 차 권선 계수.

고조파 차수	단층 동심권 ($N_1:N_2 = 17:17$)	혼합층 동심권 ($N_1:N_2:N_3 = 17:8:9$)	혼합층 동심권 ($N_1:N_2:N_3 = 17:10:7$)	혼합층 동심권 ($N_1:N_2:N_3 = 17:12:5$)	혼합층 동심권 ($N_1:N_2:N_3 = 17:14:3$)
1 st	0.958	0.923	0.931	0.938	0.946
5 th	0.205	0.044	0.080	0.116	0.152
7 th	0.158	-0.052	-0.006	0.041	0.088
11 th	0.126	-0.136	-0.078	-0.020	0.039
13 th	0.126	-0.136	-0.078	-0.020	0.039
17 th	0.158	-0.052	-0.006	0.041	0.088
19 th	0.205	0.044	0.080	0.116	0.152
23 rd	0.958	0.923	0.931	0.938	0.946
25 th	-0.958	-0.923	-0.931	-0.938	-0.946

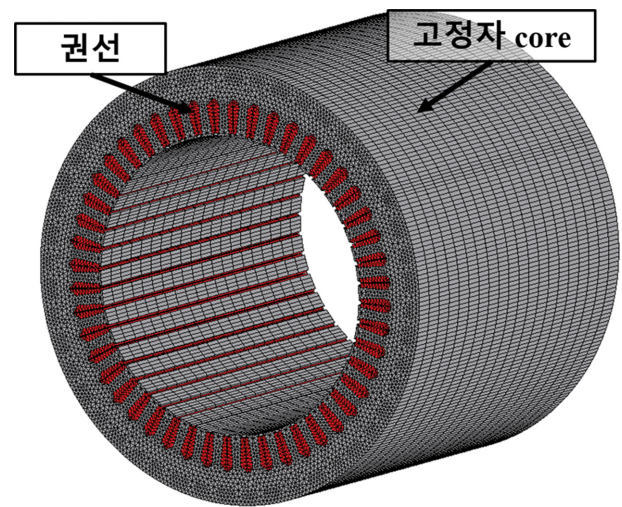
당 권선 배치를 통해 코일 당 턴 수를 다르게 할 수 있고 그에 따라 턴 수의 비율을 통해 권선 계수를 바꿀 수 있다. 동심권은 같은 코일 중심을 갖기 때문에 분포 계수는 1로 고정된다. 하지만 코일 마다 피치가 달라지고 턴 수를 변화시킬 수 있기 때문에 다음과 같은 식으로 권선 계수를 계산할 수 있다.

$$k_{wk} = \frac{N_1}{N_t} \times k_{pk, 1} + \frac{N_2}{N_t} \times k_{pk, 2} + \dots \quad (14)$$

여기서 N_x 는 x 번째 코일의 턴 수를 의미한다. 이때, x 는 한 극 기준 코일 개수 만큼 존재한다. 예를 들어, Fig. 4(c)와 같이 권선 배치 시 대상 모델 기준 x 는 3까지 존재한다. 또한, N_t 는 각 코일의 턴 수의 합이고 $k_{pk, x}$ 는 x 번째 코일의 단절 계수를 의미하고 식 (12)와 같이 코일 마다 계산된다. 즉, Fig. 4(c)에서 보이는 것처럼 1/4 모델 기준으로 A상 권선은 3개의 코일이 존재하고 각 코일의 턴 수와 단절 계수를 통해 각 코일의 턴 비율에 따라 Table IV와 같이 권선 계수를 계산할 수 있다. Table IV에서 보이는 것처럼 전절권과 단층 동심권의 권선 계수가 동일하고 혼합층 동심권의 권선 계수는 각 코일 당 턴수 비율에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 대상 모델에서 출력은 유지한 채로 진동 저감 효과를 향상시키기 위해 기본과 권선 계수는 기존 전절권과 비슷한 채로 유지되면서 고조파 권선 계수는 크게 저감 되는 코일의 턴 비율이 $N_1:N_2:N_3 = 17:10:7$ 인 혼합층 동심권을 선정하였다.

IV. 진동 저감 효과 검증

본 장에서는 대상 모델에 기존 전절권 적용 모델과 제안된 혼합층 동심권 적용 모델간의 진동 특성을 비교한다. 이를 통해 유도 모터에 혼합층 동심권 배치에 따른 진동 저감 효과를 검증한다. 정격 부하에서 2-D 과도 해석 결과에서 수렴된 전원 주파수 기준 한 주기의 전자기 응력을 계산하고 이를 주파수 도메인으로 변환하여 3-D 구조 해석을 진행하고 고정

**Fig. 5.** (Color online) 3-D 구조 해석 모델링.**Table V.** 재료의 기계적 성질.

항목	고정자 core (50PN470)	권선 (구리)
밀도 (kg/m ³)	8,930	7,700
Young's modulus (GPa)	124	180
Possion's ratio	0.34	0.30

자 외경 기준 방사 방향 변형량을 계산한다. 혼합층 동심권이 적용된 모델은 동일한 정격 부하 조건에서 진동 해석을 진행하기 위해 2-D 과도 해석 시 상전류 72A_{rms}, 슬립 주파수 0.4 Hz가 인가되었다. Fig. 5는 대상 모델의 3-D 구조 해석 모델링을 보여준다. 진동의 전자기적 원인에 집중하여 분석을 진행하기 위해 하우징 구조는 무시하였다. 구조 해석 시 사용된 재료의 기계적 성질은 Table V에 제시되었다. 정격 부하 기준으로 2-D 과도 해석을 통해 계산된 전자기 응력을 2-D 고속 푸리에 변환을 수행하여 전원 주파수 기준 시간 2차를 고정하고 공간에 따른 분포를 계산한 결과는 Fig. 6과 같다. 이는 전자기 응력의 기본과 차수인 전원 주파수 기준 시간 2차에서 전자기 응력의 공간에 따른 분포를 보여준다. 권선 배

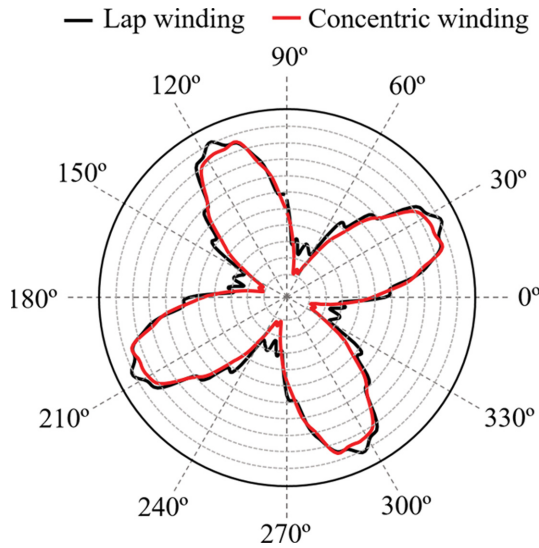


Fig. 6. (Color online) 시간 2차 기준 전자기 응력의 공간에 따른 분포.

치 변경에 따른 전자기 응력의 공간적 분포의 균일성을 비교하기 위해 최저차 force order인 4차의 전자기 응력의 크기를 기본과 크기, 그 외의 공간 차수의 전자기 응력을 고조파 크기로 가정하여 전고조파 왜율(Total harmonic distortion, THD)을 계산하면 중권 배치 모델의 THD는 46.3%, 동심권 배치 모델의 THD는 41.2%이다. 이때 공간 차수는 -56차부터 52차까지 계산되었다. 이를 통해 기존의 권선법이 적용된 모델 대비 동심권이 적용되었을 때 전자기 응력이 공간적으로 더 균일하게 분포되어있는 것을 확인할 수 있다. 2-D 과도 해석에서 고정자의 요소 별 방사 방향 및 접선 방향의 절점력(Nodal force)을 주파수 영역으로 변환하여 Fig. 5에 제시된 3-D 모델링에 매핑하여 진동 해석을 진행 하였고 결과적으로 Fig. 7에 보이는 것처럼 시간 차수 별 최대 방사 방향 변형량이 계산되었다. 전자기 응력의 기본과 차수인 시간 2차에서 가장 큰 변형량이 발생하는 것을 확인하였고 동심권

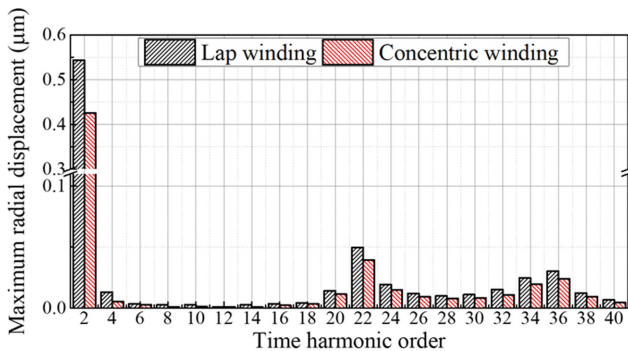


Fig. 7. (Color online) 시간 차수 별 최대 방사 방향 변형량.

을 적용하였을 때 방사 방향 변형량이 모든 시간 차수에서 감소하는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 유도 모터의 진동 저감을 위해 각 코일 턴 수의 비율을 조절하여 권선 계수를 변화시킬 수 있는 혼합층 동심권 배치를 제안한다. 첫째로, 유도 모터의 진동의 원인인 방사 방향 전자기 응력의 전기자 및 계자 소스에 따른 차수 별 분석이 수행되었다. 2-D 과도 해석을 진행하여 방사 방향 전자기 응력에 각 차수에 해당하는 성분들의 원인을 규명하고 각 차수 별 전자기 응력에 전기자 기저력 성분이 가장 큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 둘째로, 전기자 기저력 성분의 고조파를 저감하여 전자기 응력의 공간적으로 대칭적 분포를 만들기 위해 혼합층 동심권 배치에서 각 코일의 턴 수 비율을 조절하여 기존의 중권 대비 우수한 고조파 권선 계수를 갖는 턴 수 비율을 선정하였다. 마지막으로, 대상 모델에 제안된 동심권 배치를 적용하여 진동 해석을 진행하여 기존의 중권 배치 모델 대비 모든 시간 차수에서 진동 성능이 향상된 것을 확인하였다. 따라서, 다른 설계 변수를 변화시키는 재설계 과정없이 고정자 권선의 재배치를 통해서 유도 모터의 진동 특성을 향상시킬 수 있다.

감사의 글

이 성과는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 에너지수요관리핵심기술개발사업으로 수행된 연구임(No. RS-2023-00232593, 중형급 산업용 전동기 공통 기반기술 개발).

References

- [1] X. Zeng, L. Xu, and C. Zhang, 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 488 (2018).
- [2] E. B. Agamloh, A. Boglietti, and A. Cavagnino, IEEE Trans. Ind. Appl. **49**, 2496 (2013).
- [3] M. G. Bijan, M. Al-Badri, P. Pillay, and P. Angers, IEEE Trans. Ind. Appl. **54**, 4186 (2018).
- [4] L. Wang, X. Bao, C. Di, and Y. Zhou, IEEE Trans. Magn. **52**, 1 (2016).
- [5] G.-Y. Zhou and J.-X. Shen, IEEE Trans. Ind. Appl. **53**, 3361 (2017).
- [6] M. Rahmani, A. Darabi, and F. P. Deylami, IEEE Trans. Energy Convers. **38**, 2344 (2023).