

동 다이캐스팅 고속 유도전동기의 불평형 응답 해석

Unbalance Response Analysis of Copper Die Casting High Speed Induction Motor

홍 도 관*. 정 승 육**. 우 병 철*. 구 대 현*. 안 찬 우†

Do-Kwan Hong, Seung-Wook Jung, Byung-Chul Woo,
Dae-Hyun Koo and Chan-Woo Ahn

(2012년 3월 16일 접수 ; 2012년 5월 16일 심사완료)

Key Words : Induction Motor(유도전동기), Cooper Die Casting(동 다이캐스팅), ISO 1940-1, API Standard, Rotor Dynamics(회전체 동역학), Unbalance Response Analysis(불평형 응답 해석), Critical Speed Map(위험 속도 선도), Campbell Diagram(캡벨선도)

ABSTRACT

This paper deals with a copper die casting induction motor which has several advantages of motor performance. The developed motor is used as spindle motor in machining center. The dynamic characteristic analysis of rotor is dealt with for precision machining. The critical speed of rotor considering rotation and gyroscopic effect should be above operating speed, 18,000 rpm, and have a 201% sufficient separation margin. Also, the 3-D unbalance vibration response analysis is performed and enabled the prediction of the expected vibration amplitude by unbalance in high speed. The unbalance vibration responses of each position on the rotor are satisfied with allowable vibration displacement of API 611 standard according to balancing G grade(G 0.4, G 2.5, G 6.3). Copper die casting high speed induction motor is successfully developed and verified by experiment.

기호설명

U_{Per} : 허용 불평형(g·mm)
 ω : 회전체 각속도(rad/sec)

- e_{per} : 허용 불평형 편심량(g·mm/kg)
 G : 평형 특성 등급
 L_v : 최대진동레벨(μm)
 M : 로터의 질량(kg)
 N : 정격 회전수(rpm)

1. 서 론

세계적으로 에너지자원 고갈문제와 더불어 지구 온난화문제가 최근 화두가 되고 있으며, 2008년 국내에서도 기후변화대응 종합기본계획을 세워 고효율 전기기기의 사용을 권장하고 있다. 고효율 전동기 분야에서도 2008년 최저 효율제를 실행하여 국가에너지의 15%에 해당하는 3상 유도전동기의 효율을 프리미엄급으로 생산하게 되었으며 며지않아 슈퍼프리미엄급으로 발전할 것으로 예상되고 있다.

동 다이캐스팅 전동기는 기존 알루미늄 다이캐스팅 전동기의 회전자 바를 동으로 바꾸기만 하여도

* 교신저자; 정회원, 동아대학교 기계공학과
E-mail : cwahn@dau.ac.kr
Tel : (051)200-7643, Fax : (051)200-7656
** 정회원, 한국전기연구원 전동력연구센터
*** 동아대학교 대학원 기계공학과

이 논문의 일부는 2012년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

효율이 2~5% 정도로 향상되기 때문에 많은 에너지 절감을 얻을 수 있으며 회전자 동손이 낮기 때문에 회전자 발열이 감소되어 알루미늄 다이캐스팅 전동기와 비교해 볼 때 약 5°C의 온도가 낮다^(1,2). 동 다이캐스팅으로 유도전동기를 제작하게 되면 경제성이 뛰어나기 때문에 향후 에너지 고갈에 따라 고 효율 전동기 사용이 의무화될 경우 산업에 많은 영향을 미칠 것으로 예상하고 있다.

이 논문에서는 고효율의 유도 전동기를 개발하는데 있어서 반드시 적용해야 되는 기술인 위험속도 회피기술을 적용하였다. 위험속도선도(critical speed map)를 참고하여 로터에 적합한 베어링 지지강성을 예측하고 베어링을 선정하여 위험속도 해석을 수행하였다. 또한, 불평형 응답해석을 수행하여 불평형 질량으로 인해 예상되는 진동진폭의 정보를 획득하여 API(American Petroleum Institute, 미국석유협회) standard 611 및 ISO(International Standardization Organization) 1940-1 규정을 참고로 위험속도와 운전속도와의 분리여유 및 불평형 질량에 의한 로터 변위의 최대 허용 진동레벨을 검토하였다^(3~7). 알루미늄 다이캐스팅과 동 다이캐스팅의 동적 특성을 상호 비교, 분석하였으며, 발란싱 G 등급(G 0.4, G 2.5, G 6.3)에 따라서 불평형 진동응답특성을 검토하였다.

2. 동 다이캐스팅 유도전동기

이 논문에 사용된 동 다이캐스팅 제어용 유도전동기는 11.2 kW, 18,000 rpm 급으로, 자계해석을 통해 사양을 결정하였다. Table 1에 동과 알루미늄의 물성을 비교였으며 개발 전동기의 사양은 Table 2에 나타내었다.

공작기계 스플енный 개발 시제품과 단품들을 Fig. 1에 나타내었으며 또한, 해석 모델인 유도전동기의 로터를 구성하는 부품과 로터가 지지되는 베어링 지지

위치를 Fig. 1에 나타내었다. 동 다이캐스팅 유도전동기의 로터는 금속제의 주형을 사용하여 동을 고압气출 주조하여 로터 코어에 동바와 앤드링이 함께

Table 2 Specifications of prototype

Item	Value	Unit
1. Rated power (S1)	11.2	kW
2. Rated speed	17,567	rpm
3. Number of poles	4	poles
4. Operating frequency	600	Hz
5. Rated voltage (L-L)	380	V
6. Rated current	25.91	A
7. Rated torque	6.09	Nm
8. Maximum power	24.66	kW
9. Coil Insulation class	H	class
10. Winding connection	Y	connection
11. Resistance (L-L)	0.26	Ω
12. Material of the rotor bar	Copper	
13. Cooling type	Water cooling	
14. Power factor @ 18,000 rpm	0.741	%

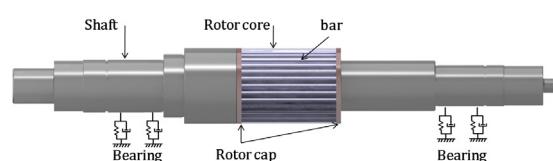


Fig. 1 Prototype and rotor for copper die casting

Table 1 Comparison copper with aluminum

	Copper	Aluminum
Melting point	1,084.5 °C	660.4 °C
Specific gravity	8.92	2.70
Conductivity	$1.69 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$	$2.62 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

Table 3 Mechanical properties of used material

Item	Material	Shaft	Rotor core	Bar & Rotor cap
	Steel	S7	Copper	
Density(kg/m ³)	7,850	7600	8,900	
Elastic modulus(GPa)	210	200	110	
Poisson' ratio	0.3	0.3	0.33	

제작되고 이것을 축과 열박음(shrink fit) 한다.

Table 3은 각 요소의 재질과 물성치를 나타낸 것이다. 로터 코어는 35PN250(0.35t, S7)의 포스코 무 방향성 규소강판이 사용되었으며, 철손특성은 2.5 W/kg 이하이고, 자속밀도는 1.62 T이상이다. 로터의 총 길이는 460 mm이다.

3. 3차원 로터다이나믹 해석

3.1 로터 해석의 신뢰성 검증

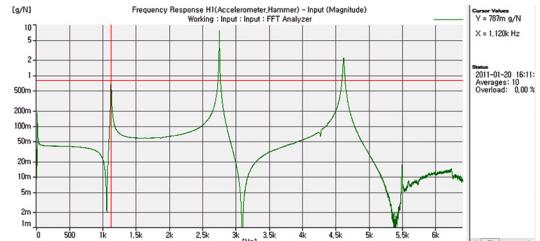
로터 해석의 신뢰성을 검증하기 위해 개발 로터의 고유진동수 해석을 수행하였다. Fig. 2의 (a)는 개발 시제품 로터를 나타내며, (b)는 모달테스팅(modal testing)을 수행하여 얻은 주파수 응답함수를 나타낸 것이다. 주파수 응답함수의 피크는 로터의 고유진동수를 나타내며 1차~3차 고유진동수는 1,120 Hz, 2,744 Hz, 4,611 Hz이다. 로터의 1차원 뼈과 3차원 모델의 고유진동수 해석 결과 1차 고유진동수가 각각 1,156 Hz, 1,175 Hz로 평가되었으며, 모달테스팅 결과와 비교하면 약 3.2%, 4.9%의 오차가 발생하여 해석 결과를 신뢰할 수 있다.

3.2 위험속도 선도(critical speed map)

회전체에서 베어링의 지지위치와 베어링 지지점의 개수, 베어링의 강성은 위험속도에 영향을 준다. 위험속도는 회전체의 운전속도와 고유진동수가 일치하는 회전속도를 의미하며, 위험속도에서 공진현상이 발생하기 때문에 공진 회피 설계가 반드시 검토되어야 한다. 위험속도 선도는 회전체의 감쇠와 연성효과를 고려하지 않은 상태에서 베어링 강성을 확인하는데 사용되었다. 따라서 베어링 지지 위치를 4군데로 결정하고 베어링 지지 강성 변화에 따라 회전체의 위험속도의 변화를 검토하였다. Fig. 3은 로터의 위험속도선도를 나타내며 유도전동기의 구동 시 필요한 베어링 강성을 결정하였다.



(a) The developed rotor prototype



(b) FRF

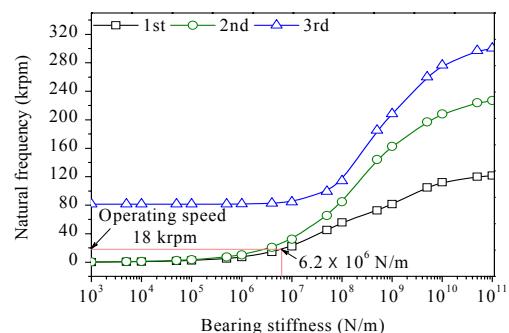
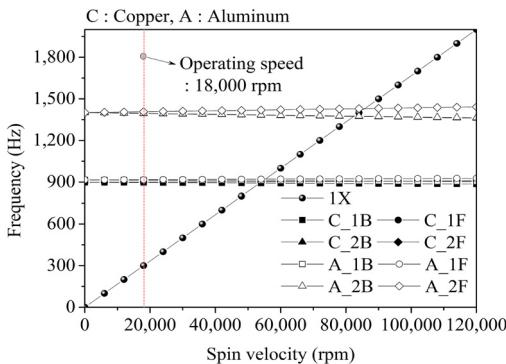
Fig. 2 The developed rotor prototype and FRF**Fig. 3** Critical speed map

Fig. 3에서 정격회전수인 18,000 rpm에서 요구되는 베어링 지지강성은 6.2×10^6 N/m으로 나타났으며, 로터가 안정적으로 회전구동하기 위해서는 베어링 강성이 6.2×10^6 N/m 이상이 되어야 한다. 따라서 유도전동기의 지지 베어링 강성을 위험속도선도를 고려하여 수평, 수직 반경방향의 볼 베어링 등가강성 1×10^8 N/m를 적용하였다.

3.3 캠벨선도(campbell diagram) 해석

회전체에서 운전속도가 위험속도 근방에 존재하게 되면 공진현상이 발생하고 공진모드로 인해 베어링부에서 피로 파괴 현상이 발생하게 된다.

캠벨선도 해석을 수행하여 자이로스코픽 효과를 고려한 위험속도를 산출 하였고, 기존의 알루미늄 다이캐스팅과 동 다이캐스팅의 결과를 상호 비교하였다. 또한 API standard 611의 회전체의 위험속도와 최대연속운전속도 사이에 20 % 이상 분리 여유가

**Fig. 4** Campbell diagram**Table 4** Whirling mode and critical speed

Whirling mode	Critical speed(rpm)	
	Copper die casting	Aluminum die casting
1st forward	54,180.7	55,209.8
Separation margin	201.0 %	206.7 %

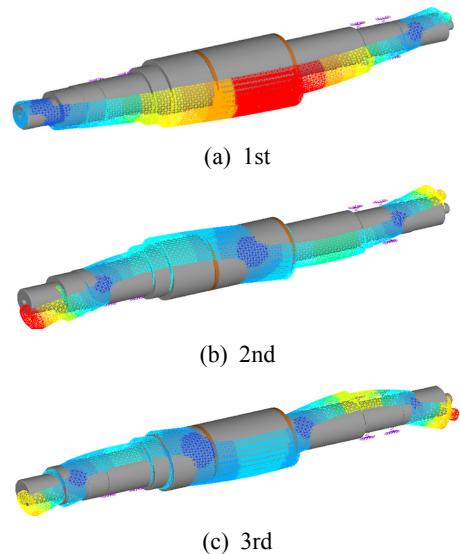
확보되어야 하는 규격을 검토하였다. Fig. 4는 3차원 유한요소 해석을 수행하여 구한 켐밸선도를 나타내었으며 동바와 엔드링의 재질에 따라서 결과가 크게 차이가 발생하지 않았으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4의 결과를 보면 동 다이캐스팅의 결과가 알루미늄 다이캐스팅의 결과에 비해서 1차 위험속도가 약간 낮음을 알 수 있다. 이는 동과 알루미늄의 밀도차에 의해 회전자의 질량 증가로 인해 위험속도가 감소하는 것으로 전체의 약 2% 감소하였다. 동 다이캐스팅의 경우에는 로터의 정격 운전속도와 약 201%의 분리여유(separation margin)가 확보되어 API규격을 충분히 만족하였으며, 알루미늄 다이캐스팅에 비해 다소 감소하였지만 분리여유가 충분하기 때문에 그 차이는 미미하다고 할 수 있다.

기존의 알루미늄 다이캐스팅과 마찬가지로 동 다이캐스팅으로 대체한 개발 로터는 위험속도 회피가 충분히 되어 고속에서도 안정하게 구동함을 확인하였다. 유도전동기 로터의 1차 위험속도에서 전방 휘돌림 모드(forward whirling mode)가 발생하였으며 Fig. 5에 나타내었다.

3.4 불평형 응답(unbalance response)해석

회전체를 실제로 제작 시 제작오차와 재료의 불

**Fig. 5** 1st~3rd whirling mode of rotor

균일로 인해 회전체는 불평형 질량을 가진다. 이는 기계의 진동을 유발하며 베어링 등의 다른 부품에 파괴를 유발한다. 또한 위험속도 해석만으로는 불평형으로 인해 예상되는 진동의 진폭을 알지 못한다. 따라서 불평형 응답해석을 수행하여 예상되는 진동의 진폭을 반드시 검토해야 한다. 만일 평형 특성 등급으로 만족하지 않을 때는 평형 특성 등급을 조절하여 만족할 때까지 발란싱 작업을 해야 한다.

(1) 불평형 질량 제한치 결정

허용 불평형량이란 로터의 평형 특성 등급에 의해 정해지는 로터의 허용 불평형 편심량과 로터의 유효질량을 곱한 값을 의미하며 식(1)과 같다.

$$U_{per} = e_{per} \times m \quad (\text{g}\cdot\text{mm}) \quad (1)$$

허용 불평형 편심량은 평형 특성 등급을 고려해야 하며 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$e_{per} = G \times \frac{1}{\omega} \times 10^3 \quad (\text{g}\cdot\text{mm}/\text{kg}) \quad (2)$$

ISO 1940-1에서 규정에서 검토하고자 하는 모델을 고려하여 평형 특성 등급을 2.5로 결정하였다. Table 5 회전 형태에 따른 평형 특성 등급을 나타낸 것이다.

Table 5 Balance quality grade of rotating rigid body

Balance quality grade	Vibration velocity(mm/s)	Rotor type : general example
G 2.5	2.5	Machine -tool drives Turbo compressor Small electric armatures Turbine-driven pumps

검토대상의 모델에 대한 정보를 식(1)과 식(2)에 대입하여 허용 불평형량을 식(3)과 같이 계산할 수 있다.

$$e_{per} = 2.5 \times \left(\frac{60}{2 \times \pi \times 18,000} \right) \times 10^3$$

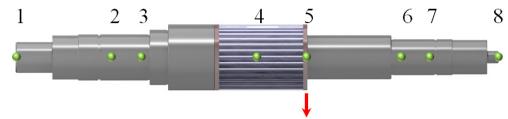
$$U_{per} = e_{per} \times 6.615 = 8.773 \text{ (g-mm)} \quad (3)$$

(2) 동 다이캐스팅과 알루미늄 다이캐스팅의 비교 불평형 진동응답에 사용되는 불평형량은 허용 불평형량의 4배로 하였으며, 모드해석에 의해 최대 변위 지점에 위치시켜 해석을 수행하였다. Fig. 6의 (a)는 불평형 응답점을 나타내며, 5번 위치에 불평형을 적용하였다. Fig. 6의 (b)는 5번 위치에서 불평형 진동응답의 결과를 나타낸다. 정격회전속도인 18,000 rpm으로 구동 시 5번 위치에서 발생하는 동 다이캐스팅 로터의 최대 불평형 진동응답 크기는 $1.372 \mu\text{m}_{pp}$ 로 평가되었으며 불평형 진동응답의 크기는 식(4)의 API 611에서 규정하고 있는 허용 최대 진동레벨을 초과하지 않는다.

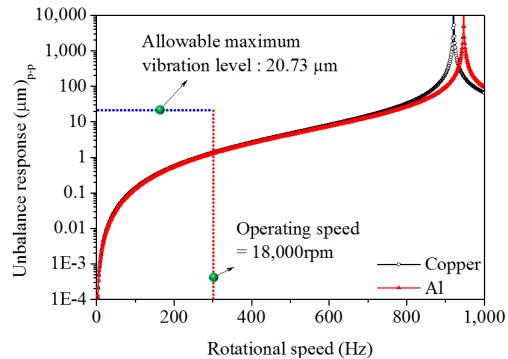
동 다이캐스팅과 알루미늄 다이캐스팅 로터의 각 위치에서 불평형 진동응답의 크기를 Table 6에 나타내었으며, 동 다이캐스팅과 알루미늄 다이캐스팅의 불평형 진동량은 최대발생 부위인 5번 위치에서 약 7.5 % 증가하였다. 동 다이캐스팅 모델이 질량증가 효과 때문에 크기가 다소 증가하였으나 허용최대 진동레벨과 약 15배의 차이가 있기 때문에 차이는 미미한 것으로 평가된다. 위험속도평가에서와 마찬가지로 기존의 알루미늄 다이캐스팅에 비해서 동 다이캐스팅으로 대체함으로 인해서 불평형 응답해석을 수행한 결과, 고속에서도 안정하게 구동함을 확인할 수 있었다.

(3) 동 다이캐스팅 불평형 진동응답

1차 굽힘 모드를 고려하여 최대변위 위치와 양



(a) Vibration exciting and response position



(b) Vibration response of 5 position

Fig. 6 Unbalance response of copper & aluminum die casting rotor**Table 6** Unbalance vibration response of a rotor

Position	1	2	3	4	5	6	7	8
Aluminum	0.503	0.154	0.388	1.118	1.277	0.681	0.370	0.419
Copper	0.552	0.151	0.402	1.192	1.372	0.796	0.479	0.331

Unit : μm_{pp} , operating speed : 300 Hz, 18,000 rpm

Table 7 Unbalance and unbalance position

Case	Unbalance(g-mm)	Number of position
	$4U_{per}$	
Bending	35.092	5
In phase	17.546	1, 8
Out of phase	17.546	1, 8

끝점에 불평형량을 위치시켜 동위상과 역위상에서 각 지점의 불평형 응답을 검토하였다. 즉, 불평형량의 위치에 따라 세 가지 경우(bending, in phase, out of phase)로 해석을 수행 하였다. Table 7은 세 가지 경우에 따라 불평형량의 크기와 위치를 나타내었고 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 또한 Table 8에 불평형량의 위치에 따른 해석결과를 정리하여 나타내었다.

불평형 진동응답의 크기는 API 611에서 규정하고

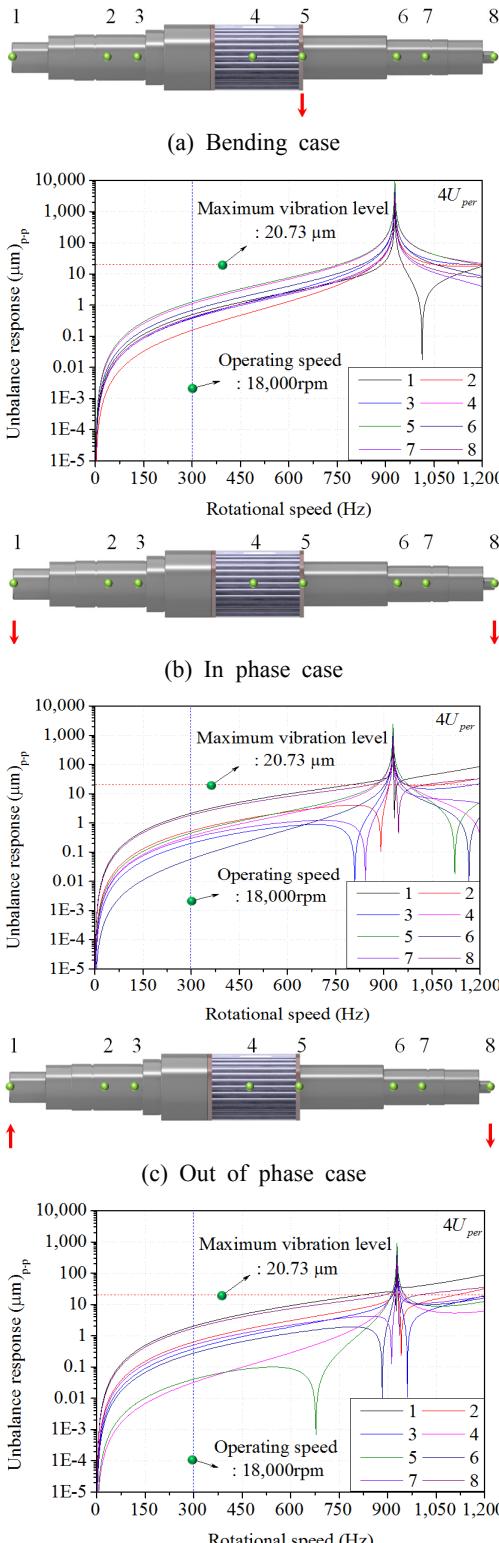


Fig. 7 Unbalance response of rotor

Table 8 Unbalance vibration response of copper rotor according to 3 types of case

Number of location	4U _{per}		
	Bending	In phase	Out of phase
1	0.552	2.156	2.044
2	0.151	0.537	0.638
3	0.402	0.201	0.381
4	1.192	0.356	0.324
5	1.372	0.452	0.041
6	0.796	0.058	0.278
7	0.479	0.300	0.511
8	0.331	1.865	1.754

Unit : $\mu\text{m}_{\text{p-p}}$, operating speed : 300 Hz, 18,000 rpm

있는 최대 진동레벨을 초과하지 않아야 하며 최대 진동레벨은 식(4)로 표현된다.

$$L_v = 25.4 \sqrt{\frac{12,000}{N}} (\mu\text{m}_{\text{p-p}}) \quad (4)$$

따라서, 동 다이캐스팅 유도전동기 해석모델의 불평형 진동응답은 식(4)에 의해 $20.73 \mu\text{m}_{\text{p-p}}$ 를 초과해서는 안 된다. 동 다이캐스팅으로 세 가지 형태의 불균형 응답의 크기는 API에서 규정하고 있는 최대 진동레벨(L_v)을 초과하지 않는 매우 안정한 범위에 있으며, 고속에서도 안정하게 구동함을 평가하였다.

(4) 발란싱 등급에 따른 불평형 진동응답

로터의 발란싱 등급에 따른 불평형 진동응답의 크기를 비교해보기 위해서 ISO 1940-1의 G등급을 다음과 같이 G 0.4, G 2.5, G 6.3의 세 가지 경우로 나누어 해석을 수행하였다. G값이 작을수록 정밀발란싱을 나타낸다.

실제로 개발 모터가 충분한 위험속도 회피가 되었음에도 불구하고 구동 시 진동이 크게 발생한다면 현 단계 로터의 발란싱 등급보다 더 정밀한 발란싱이 요구된다. 따라서 이 논문에서는 발란싱 등급에 따라서 발생하는 로터의 불평형 응답의 변위가 어떻게 변화하는지 특성을 파악하고자 하였다. 개발 고속 유도전동기는 머시닝 센터의 정밀 가공용

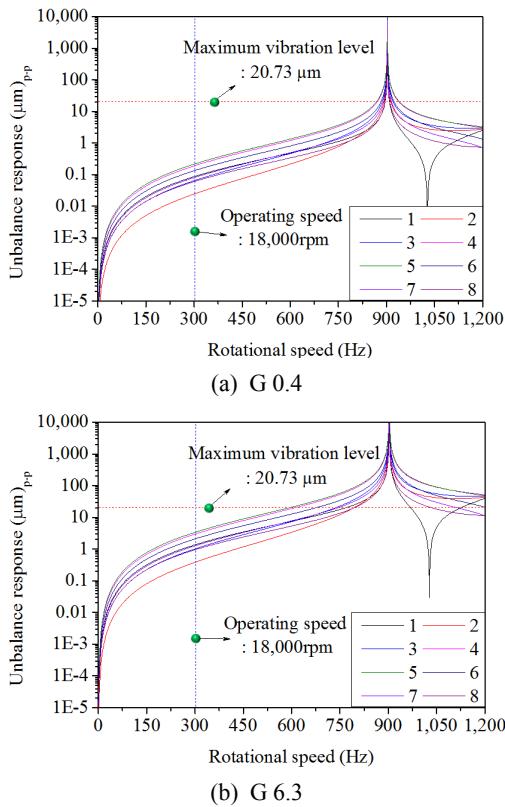


Fig. 8 Unbalance response of rotor according to balancing G grade

Table 9 Unbalance vibration response of according to balancing G grade

$4U_{per}$			
Number of location	G 0.4	G 2.5	G 6.3
1	0.087	0.552	1.365
2	0.024	0.151	0.384
3	0.064	0.402	1.016
4	0.189	1.192	2.977
5	0.214	1.372	3.382
6	0.132	0.796	2.087
7	0.080	0.479	1.268
8	0.060	0.331	0.950

Unit : μm_{pp} , operating speed : 300 Hz, 18,000 rpm

이나 액정유리 평면가공 등의 정밀 가공에 사용되기 때문에 발란싱 등급에 따른 불평형 응답특성을 파악하는 것이 중요하다고 할 수 있다. Fig. 8은 발란싱 등급에 따라서 로터의 불평형 진동응답결과를

나타낸다. G등급의 크기가 증가할수록 발란싱 정도가 정밀하지 못하기 때문에 불평형 진동응답의 크기가 크게 발생함을 파악할 수 있다. Table 9는 Fig. 8의 발란싱 등급에 따른 로터의 불평형 진동응답 결과의 크기를 나타낸다.

4. 결론

이 연구에서는 고효율을 위해 반드시 검토해야 하는 공진회피 기술과 불평형 응답해석을 적용하였다. 3차원 유한요소해석을 수행하여 캠벨선도를 구하였으며 운전속도와 위험속도의 약 201.0 %의 충분한 분리여유를 확보하였다. 또한 ISO 1940-1 및 API standard 611에서 제안한 불평형량을 해석 모델에 적용하여 평가하였다. 불평형 상태에서 API에서 제안한 최대진동레벨과 비교하였으며 허용 불평형량의 4배 결과 최대변위는 동위상의 1번 지점에서 $2.156 \mu\text{m}_{pp}$ 이며 충분히 안정한 불평형 응답을 얻을 수 있었다. 해석한 결과를 바탕으로 유도전동기를 제작하였으며 고속, 고효율의 11.2 kW, 18,000 rpm 급 3상 유도전동기로 약 87 %의 효율을 얻었다. 그리고 위험속도 회피 기술을 적용하여 고속에서도 안정하게 구동하도록 하였다.

참고문헌

- (1) Lie, S. and Pietro, D., 1995, Copper Die-cast Rotor Efficiency Improvement and Economic Consideration, IEEE Transactions of Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 419~424.
- (2) Malinowski, McCormick, J. and Dunn, K., 2004, Advances in Construction Techniques of AC Induction Motors : Preparation for Super-premium Efficiency Levels, IEEE Transactions of Industry Applications, Vol. 40, No. 6, pp. 1665~1670.
- (3) Jung, S. W., Hong, D. K., Woo, B. C., Koo, D. H. and Ahn, C. W., 2011, Rotordynamics of Induction Motor for Copper Die Casting Control, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 157~158.
- (4) Hong, D. K., Woo, B. C. and Koo, D. H., 2010, Rotordynamics and Unbalance Response

Analysis 200 kW, 15 krpm, 3 Phase Induction Motor,
PRZEGŁĄD ELEKTROTECHNICZNY(Electrical Review), R. 86 NR 5, pp. 129~132.

(5) ISO 1940-1, Mechanical vibration - Balance Quality Requirements of Rigid Rotors - Part 1 : Determination of Permissible Residual Unbalance.

(6) API Standard 611, 2008, General-purpose

Steam Turbines for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services, Fifth Edition, American Petroleum Institute, Washington, D.C..

(7) Ganatra, N. and Ratel, R. C., 2011, Witness Testing of API 610 Centrifugal Pumps and API 611 Steam Turbines, Proc. of the 27th International Pump Users Symposium, pp. 71~79.