

유도전동기 회전자 제작시 압입작업 평가 II

박상철
거제대학교 조선해양공학과

Evaluations of Swaging Process for Rotor Core of Induction Motors II

Sang-Chul Park

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Koje College

요약 유도전동기 회전자는 rotor core를 일정한 높이로 쌓은 후 rotor core slot에 Cu bar를 열박음(shrinkage fit)작업으로 고정된 후 Cu bar 표면을 punch로 길이방향, 원주방향으로 순차적으로 압입(swaging)하여 제작된다. 본 연구에서는 Cu bar 표면을 압입할 때 Cu bar 표면에 발생하는 압입깊이, 잔류응력 분포 그리고 rotor core slot과 Cu bar 접촉면에 작용하는 접촉력(contact force)을 평가하고자 하였다. 한편 실제의 압입작업은 복잡한 3차원 문제이나 수치해석적인 접근을 위하여 단순화된 2차원 cyclic symmetry 해석모델을 개발하였으며 이러한 해석모델을 사용하여 일정한 압입압력에서 4가지 종류의 Cu bar 형상에 대하여 압입량과 접촉력을 평가하였다. 탄소성 수치해석 결과 1) sample Cu bar block model을 사용하여 단순화된 2차원 수치해석 모델을 개발하였고 2) rotor core 압입작업시 일정한 압입압력에서 Cu bar 표면의 압입량은 Cu bar 형상에 크게 관계없이 거의 일정하며 3) 압입작업시 punch에 가해지는 압입압력으로부터 rotor core slot과 Cu bar 접촉면에 작용하는 총 접촉력을 추정할 수 있는 근사식을 제안하였다.

Abstract This study evaluated the displacements of a Cu bar in the Y-direction and the relationship between swaging pressures and total contact forces to increase the productivity of the rotor core swaging process. Elastic-plastic numerical analyses of four different Cu bar shapes were performed with a constant swaging pressure to evaluate the displacements of the Cu bar in the Y-direction and the contact force distributions at the contact surfaces during the swaging process. Based on the numerical analysis results, the following conclusions were obtained. First, a simplified 2-dimensional cyclic symmetric analysis model was developed for the numerical analysis of the rotor core swaging process. Second, the final displacements of the Cu bar in the Y-direction were nearly the same as the change of the Cu bar size at a constant swaging pressure. Third, a linear relationship between the swaging pressures and the total contact forces, the so called resistance forces, was suggested.

Keywords : Contact Force, Cu Bar, Displacement, Numerical Analysis, Pressure, Rotor Core, Swaging

1. 서론

일반적으로 자로의 일부가 연속적으로 회전에 따라 전력을 발생시키거나 또는 전력을 받아 기계동력을 발생시키는 장치를 회전자라고 한다. 회전기는 전력을 받아 전자력으로부터 기계동력을 발생시키는 전동기(motor)와 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 발전기

(generator)로 나눌 수 있다. 현재 산업체 현장에서 기계동력이 필요한 경우에는 교류전류를 사용하여 쉽게 기계동력을 얻을 수 있는 유도전동기가 널리 사용되고 있다. 회전자(rotor)는 이러한 유도전동기를 구성하는 여러 부품 중 하나로, rotor core slot에 열박음(shrinkage fit)작업으로 Cu bar를 삽입한 후 삽입된 Cu bar 상부 표면을 일정한 압입압력으로 punch를 눌러 core slot과 Cu bar

*Corresponding Author : Sang-Chul Park(Koje College)

Tel: +82-55-680-1698 email: scpark@koje.ac.kr

Received February 28, 2017

Revised (1st April 10, 2017, 2nd May 10, 2017)

Accepted June 9, 2017

Published June 30, 2017

접촉면에 국부적인 소성변형을 유발시켜 Cu bar를 rotor core slot에 고정시켜 제작하고 있다[1]. 그러나 이렇게 core slot에 고정된 Cu bar는 유도전동기 시운전시 core slot과 Cu bar사이에서 간격이 발생하여 소음이 발생하고 회전자 전기효율이 감소하여 압입작업을 다시 수행해야 하는 경우가 발생하고 있다. 즉, 조립된 유도전동기 부품을 전부 해체하고 punch에 추가적인 압력을 가하여 Cu bar를 다시 압입하여 고정시킴으로서 노동력이 추가로 투입되어 생산성 향상에 문제점으로 작용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 Cu bar 압입작업시 Cu bar 표면에 발생하는 압입량, 잔류응력 분포 그리고 core slot과 Cu bar 접촉면에 발생하는 접촉력(contact force)을 수치해석적인 방법을 사용하여 평가함으로써 유도전동기 회전자 Cu bar 압입작업시 현장 작업기준을 결정하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다[2].

2. 본론

2.1 회전자 압입작업

회전자 제작과정을 살펴보면 우선 Fig. 1과 같이 두께 (~0.5mm)가 얇은 rotor core를 정해진 높이(~760mm)만큼 적층한 후 가열로에서 약 200℃로 가열을 한다. 가열이 끝나면 rotor core를 조립대로 이동하여 팽창된 rotor core slot에 Cu bar를 삽입하여 조립한 후 삽입된 Cu bar 표면을 punch로 압입하여 Cu bar를 rotor core slot에 단단히 고정시키고 있다. 회전자 rotor core에 사용된 재료는 SS400 규소강판, Cu bar에는 pure copper를 사용하며 이 재료들에 대한 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다[3].

2.2 수치해석모델 개발

회전자는 Fig. 2와 같은 압입장비 위에서 core slot에 삽입된 Cu bar(~760mm)를 길이 20mm인 punch(Fig. 7 참조)를 사용하여 순차적으로 일정한 간격의 길이방향 및 원주방향 압입작업에 의하여 제작된다. 이러한 작업

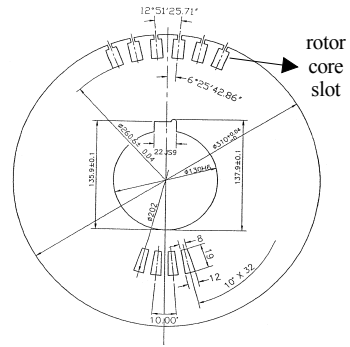


Fig. 1. Shape of rotor core

과정을 수치해석적인 방법으로 평가하기 위해서는 당연히 3차원 해석모델을 사용하여야 하나 탄소성 수치해석은 해석시간이 많이 소요되고 신뢰성 있는 해석결과를 얻기가 쉽지 않으므로 단순화된 2차원 수치해석 모델을 개발하고자 하였다. 따라서 Fig. 3에 나타낸 2개의 sample Cu bar block, 즉 높이 5mm, 폭 10mm는 동일하나 길이가 다른 15mm, 30mm인 시편을 제작하여, 동일 압입압력 하에서 길이 20mm punch로 Cu bar를 압입하는 경우에 2D, 3D 해석모델을 사용하여 탄소성 수치해석 및 실험을 통하여 해석모델의 유효성을 평가하고자 하였다. 한편 Fig. 3 하부에는 압입작업 후 압입된 Cu bar 표면 모습을 나타내었다.

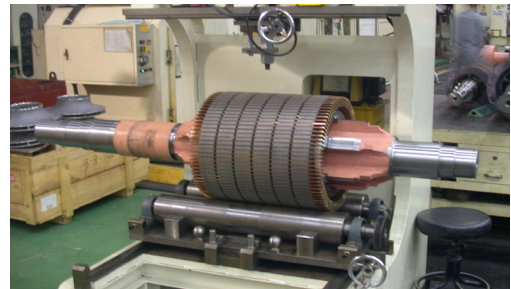


Fig. 2. Schematic of Cu bar swaging equipment

Table 1. Chemical compositions & mechanical properties of rotor core (weight %, kg/mm²)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Y.S	T.S	EL.(%)
SS400	0.02	1.13	0.4	0.025	0.008	0.02	0.03	0.01	24	47	37.1
Cu bar	-	-	-	-	-	-	-	100	26	40	39.5

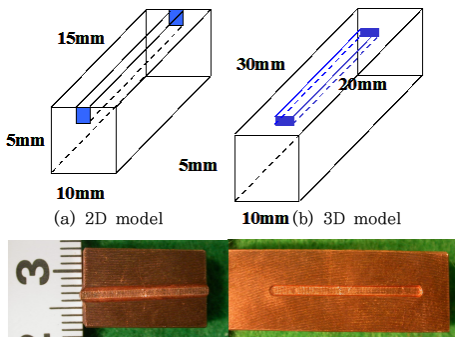


Fig. 3. Sample 2D & 3D Cu bar block model

Sample Cu bar block model에 대하여 실제 시험결과를 기준으로 하여 Fig. 4.(a),(b)에 나타난 전체 1/2 형상의 2D plain strain model과 전체 1/4 형상의 3D model을 사용하여 수치해석 모델의 유효성을 평가하였다. 수치해석은 압입압력 13,000kPa에서 탄소성해석 전용프로그램인 MARC를 사용하여 비선형 재료특성, 등방성 가공경화, 대변형 및 접촉문제, 자동 remeshing 기능 등을 적용하여 해석을 실시하였으며 punch로 1회 압입한 후 punch를 제거한 상태에서의 Cu bar 최종 변형양상을 Fig. 5에 나타내었다[4].

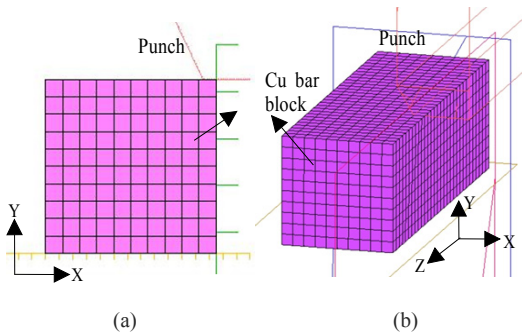


Fig. 4. Sample Cu bar block analysis model (a) 2D model (b) 3D model

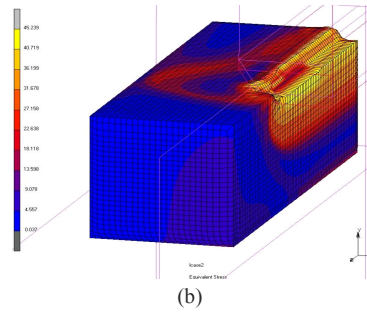
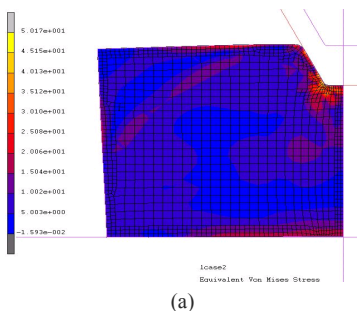


Fig. 5. Sample Cu bar block deformed shape (a) 2D model (b) 3D model

Table 2. Max. displacements in Y-direction (unit: mm)

Item	Experiment	Numerical Analysis	Deviation (%)
2D model	-0.96	-1.15	19.7%
3D model	-0.30	-0.40	33.3%

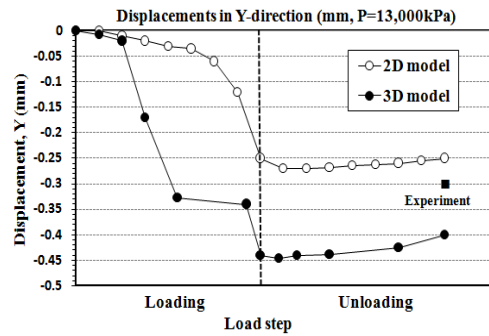


Fig. 6. Sample Cu bar block analysis results

그림에서 보면 punch 하부가 맞닿은 부분에 압입이 크게 발생하며 3D model에서 길이방향 모서리 부분보다는 중심부에 압입이 다소 크게 발생함을 알 수 있다. 수치해석에 의한 Y방향 최대 압입량과 실험에 의한 측정 결과를 Table 2에 나타내었으며, 실험결과에 따르면 Y방향 최대 압입량은 2D model에서 0.96mm, 3D model에서 0.3mm로 주변 구속력의 차이로 인하여 2D model의 압입량이 3D model보다 크게 나타남을 알 수 있다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교해 보면 2D model에서 19.7%, 3D model에서는 33.3% 차이가 발생함을 알 수 있다. 따라서 3차원 압입공정을 2차원 수치해석 모델을 사용하여 신뢰성 있는 결과를 얻기 위하여 2차원 plain strain 모델을 수정하여 재해석을 실시하였으며 그 결과를 3차원 sample Cu bar block 시험결과와

비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 3차원 해석결과는 Y방향 압입량이 -0.40mm인데 반하여 2차원 해석결과는 -0.25mm로 실험결과와 오차가 33.3%에서 16.6%로 감소하였으나 여전히 다소 큰 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 오차는 해석시 사용된 재료의 비선형 물성, 부재간의 접촉문제 등 여러 오차가 중첩되어 발생한 것으로 판단되나 이후 압입공정에 대한 해석은 상기 수치해석 조건을 사용하여 수행하였다[5-6].

2.3 Cu bar 압입작업시 수치해석

전동기의 회전자 Cu bar 압입작업시 Cu bar 표면에 발생하는 압입량과 rotor core slot 접촉면에 발생하는 접촉력을 평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석대상은 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 4가지 rotor core 형상으로 하였으며 자세한 rotor core slot, Cu bar 형상은 Fig. 7, Table 3에 나타내었다. Case-A~D는 slot 개수가 32, 40개이며 각각의 rotor core slot 형상에 따라 Cu bar의 폭, 높이가 서로 다르게 규정되어 있다. 이러한 rotor core의 Cu bar 압입작업에 대하여 Fig. 8과 같이 단순화된 2차원, cyclic symmetry 해석모델을 채용하여 수치해석을 실시하였으며, 해석시에는 압입압력 40,000kPa, a=2mm, b=1mm, L=20mm인 punch 형상을 고려하여 전체 요소를 모델링한 후 1회 압입에 따른 압입량과 접촉면에서의 접촉력을 평가하였다.

이러한 압입작업 조건에 대한 수치해석 결과로 변형양상 및 잔류응력 분포를 Cu bar 부분을 중점적으로 Fig. 9, 압입압력이 loading, unloading함에 따른 Cu bar 표면의 Y방향 압입량 변화를 Fig. 10, 최종 압입량을 Table 4에 나타내었다. Fig. 9는 punch로 Cu bar 표면을 압입한 후 punch를 제거한 상태에서의 Cu bar 압입상태와 rotor core, Cu bar에 존재하는 잔류응력을 등가응력으로 나타낸 것으로, core slot 형상이 유사한 case-A와 B 그리고 case-C와 D는 응력분포에서 서로 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

Punch 하부가 직접 맞닿아 작용한 Cu bar 중심부 부근에 최대 잔류응력이 발생하며 또한 Cu bar와 core slot 상부가 접촉하는 부분에 높은 잔류응력이 발생하는 반면에 Cu bar 하부에는 낮은 수준의 잔류응력이 발생함을 알 수 있다. 이러한 분포는 기본적으로 소성변형량과 관계가 있으며 case-A와 B에서는 압입에 의하여 밀려난 Cu bar 소재가 인접한 접촉면의 공간, 즉 slot 목부위와

접촉면 모서리로 이동하면서 Cu bar와 rotor core 접촉면에 응력집중이 다소 크게 발생함을 알 수 있으며 case-C와 D에서는 접촉면이 상대적으로 증가하면서 잔류응력이 비교적 넓게 작용함을 알 수 있다. Fig. 10, Table 4를 살펴보면 결과적으로 Cu bar size에 크게 관계없이 최종 압입량은 거의 동일함을 알 수 있으며, 압입 후 punch를 제거했을 때 발생하는 탄성 회복량도 작으며 거의 동일함을 알 수 있다.

Table 3. Rotor core slot and Cu bar size (unit: mm)

Item	Case-A	Case-B	Case-C	Case-D
e	11.25°	9°	9°	9°
a	16.2	12.1	13.7	8.1
b	19.2	20.2	27.7	36.1
c	5.0	3.2	5.8	5.6
d	6.5	4.0	5	4.0

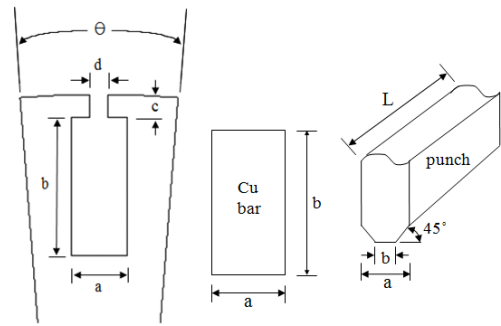


Fig. 7. Shape of rotor core slot, Cu bar and punch

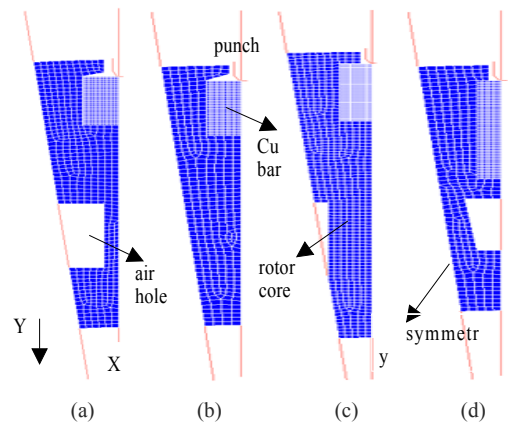


Fig. 8. Rotor core swaging analysis model (a) Case-A (b) Case-B (c) Case-C (d) Case-D

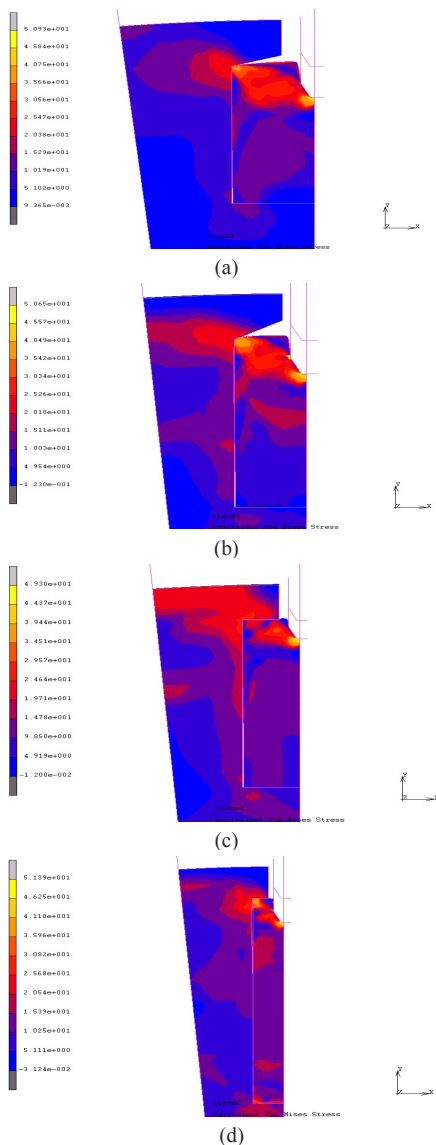


Fig. 9. Deformed shape and residual stress (equiv. kg/mm²) (a) Case-A (b) Case-B (c) Case-C (d) Case-D

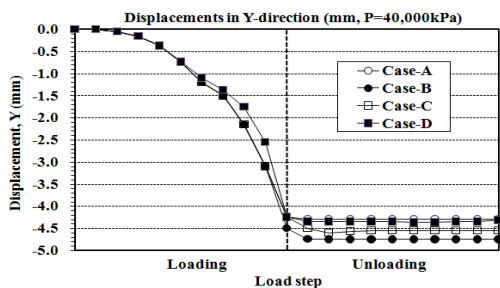


Fig. 10. Displacement change during swaging process

Table 4. Final displacements in Y-direction (unit: mm)

Item	Case-A	Case-B	Case-C	Case-D
Displacements in Y-direction	-4.3	-4.75	-4.55	-4.32

2.4 Cu bar 압입작업시 접촉력 평가

현장에서 품질이 보증된 회전자를 생산하기 위해서는 압입작업시 검증된 압입압력으로 압입작업을 하는 것이 중요하다. 따라서 Fig. 8에 나타낸 rotor core model에 Cu bar를 40,000kPa 압입압력으로 압입시 rotor core slot과 Cu bar의 접촉면에 발생하는 총 접촉력의 변화를 평가하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 해석결과 동일한 압입압력에서 loading시 Cu bar의 높이/폭 (b/a) 비가 증가함에 따라 총 접촉력은 증가하여 차이가 발생하나 unloading시 최종적으로 Cu bar 접촉면에 발생하는 접촉력을 합산한 총 접촉력은 각 case에 따라 $F_x=2,160\sim 2,729\text{kg}$ 로 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 압입작업시 Cu bar 형상에 크게 관계없이 punch에 작용하는 압입압력에 따라 Cu bar와 rotor core slot 접촉면에 발생하는 총 접촉력을 근사적으로 추정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 case-A Cu bar를 대상으로 압입압력을 10,000kPa에서 40,000kPa까지 10,000kPa씩 증가시켜 평가한 총 접촉력 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 총 접촉력은 압입압력에 비례하여 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 따라서 이상의 해석결과를 바탕으로 Cu bar 형상 및 크기에 크게 관계없이 압입압력과 총 접촉력 관계를 Fig. 13으로부터 아래와 같은 식 (1)로 추정할 수 있다.

$$F_x = -0.07463P + 438.6 \quad (1)$$

여기서, F_x : 총 접촉력(kg), P: 압입압력(kPa)

따라서 유도전동기 운전시 회전자의 압입 부분에 문제가 발생하지 않기 위해서는 회전자 회전시 발생하는 반경방향 및 접선방향 응력으로 인한 driving force보다 큰 접촉력이 rotor core slot과 Cu bar 접촉면에 발생하도록 punch 압입압력을 결정하여 가하도록 현장 작업조건을 설정해야 한다는 것을 알 수 있다[7].

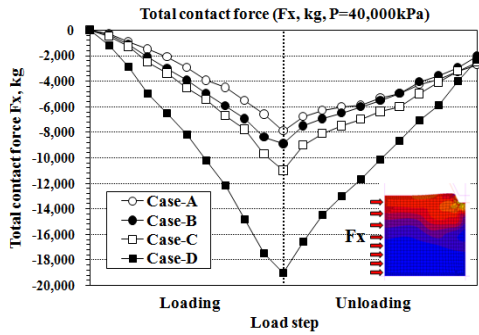


Fig. 11. Total contact force calculation (unit: kg)

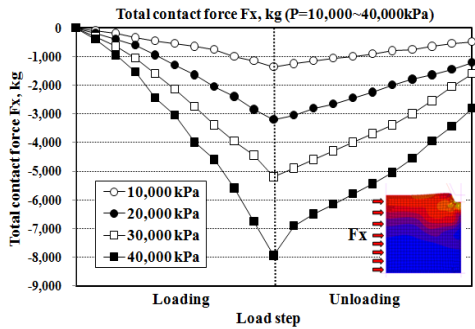


Fig. 12. Total contact force calculation (unit: kg)

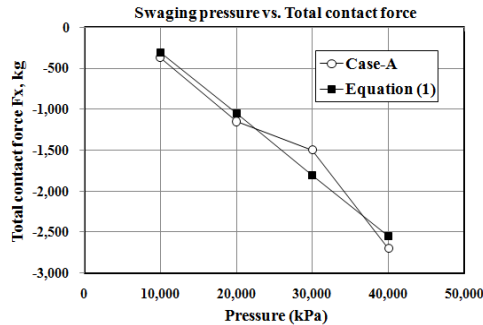


Fig. 13. Total contact force calculation (unit: kg)

3. 결론

Rotor core 압입작업시 Cu bar 표면에 발생하는 압입량과 core slot과 Cu bar 접촉면에 발생하는 접촉력을 수치해석적인 방법으로 평가하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 복잡한 회전자 압입작업을 효과적이며 신뢰성이 있는 해석결과를 얻기 위하여 단순화된 2차원 수치해석 모델을 개발하였다.

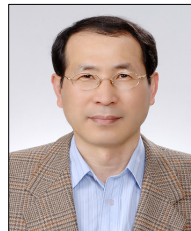
- 2) 일정한 압입압력에서 rotor core에 대한 Cu bar 압입작업 후 punch를 제거했을 때 Cu bar 표면에 발생하는 압입량은 Cu bar 형상에 크게 관계없이 거의 일정하다.
- 3) Rotor core에 대한 Cu bar 압입작업시 동일한 압입압력으로 압입작업을 한 경우 rotor core slot과 Cu bar 접촉면에 발생하는 총 접촉력은 거의 일정한 값이며, 압입압력과 총 접촉력 관계로부터 현장 작업조건을 결정할 수 있다.

References

- [1] W. R. Finley, M. M. Hodowance, "Selection of Copper vs. Aluminum Rotors for Induction Motors", Internal Technical Report, 2004.
- [2] S. C. Park, "Evaluations of Swaging Process for Rotor Core of Induction Motors", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 17, no. 10, pp. 21-26, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.21>
- [3] Metal Handbook, vol. 1, 10th Edition, ASM, 1990.
- [4] MARC Users' Manual, 2003.
- [5] J. H. Park, J. H. Lee, "The Characteristic Analysis of Single Phase SRM Considering of Rotor types", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 11, no. 11, pp. 4522-4528, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.11.4522>
- [6] K. J. Oh, K. H. Kim, C. H. Park, S. J. Chung, Y. Y. Lee, "Formulation of Friction Forces in LM Ball Guides", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 40, no. 2, pp. 199-206, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.2.199>
- [7] Roark's Formula for Stress and Strains, 6th Edition, McGraw-Hill, 1989.

박 상 철(Sang-Chul Park)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 조선해양공학과 (조선공학석사)
- 1998년 3월 : 오하이오주립대학교 용접공학과 (용접공학박사)
- 1987년 12월 ~ 2008년 8월 : 산업기술연구소 수석연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 거제대학교 조선해양공학과 교수

<관심분야>

용접공학, 주 단조공학, 열탄소성 수치해석