

## SUS304N 코일 웨지 인발 공정의 설계, 제조 및 평가

정중은<sup>1</sup> · 김세종<sup>1</sup> · 배성준<sup>1</sup> · 남궁정<sup>2</sup> · 김성민<sup>3</sup> · 김성인<sup>3</sup> · 이광석<sup>1,#</sup>

### Process Design, Fabrication, and Evaluation of Cold Drawn SUS304N Coil Wedge

J. E. Jung, S. J. Kim, S. Bae, J. Namkung, S. M. Kim, S. I. Kim, K. S. Lee

(Received April 4, 2019 / Revised April 24, 2019 / Accepted May 21, 2019)

#### Abstract

In this study, the first drawing die for the production of coil wedge is redesigned in order to enhance properties such as dimensional accuracy, dimensional uniformity, non-magnetism, and residual stress. The equivalent strain distribution is observed to be asymmetric at certain corners of the product and un-filling of material is also observed at the same location, based on the results of FEM simulation for the current drawing process. Additionally, a relatively huge amount of deformation is concentrated on the surface of the reference product leading to an increase in magnetic component and surface residual stress. After re-designing the cross-section of the first drawing step process conformed to relatively higher amount of reduction ratio, reduction of both surface residual stress and the volume fraction of magnetic component could be achieved for the finally-drawn coil wedge product.

**Key Words:** Cold Drawing, Coil Wedge, Austenitic Stainless Steel, FEM Simulation, Dimensional Accuracy

#### 1. 서 론

발전기는 회전체(rotor) 내부의 코일이 회전함에 따라, 고정체(stator)에 삽입된 코일(coil)을 통과하는 전자기장(electro-magnetic field)이 연속적으로 변화되어 발생된 유도 전류를 기반으로 전기를 생산한다 [1]. 중요한 요구 사항은 회전체 내부에서 생성된 전자기장이 설계와 유사하게 구현되어야 하고, 이를 위해 회전체 및 고정체를 구성하는 부품은 전자기장의 균일성(uniform distribution)과 대칭성(symetric distribution)을 해치지 않게 설계 및 제조되어야 한다는 점이다[1,2]. 코일 웨지(coil wedge)는 회전 운동 및 기자력(magneto-motive force) 등으로 인한 코일의

진동을 막기 위해 사용하는 코일 고정용 부품으로서, 발전기 회전체용 코일 웨지(rotor coil wedge)와 고정체용 코일 웨지(stator coil wedge)로 구분된다.

코일 웨지에 요구되는 특성을 금속학적 관점에서 분류해보면 먼저, 비자성 특성(non-magnetism)과 낮은 잔류 응력(residual stress)이 있다[1,2]. 비자성은 회전체에서 발생하는 전자기장을 방해하지 않기 위해 요구되며, 낮은 잔류 응력은 부품의 우수한 진직도 및 치수 정확도의 지표가 된다. 따라서 통상적으로 코일 웨지는 비자성체인 오스테나이트계 스테인레스강(austenitic stainless steel)을, 치수 정확도가 높은 가공 방법인, 냉간 인발 공정을 이용하여 제조되는 것으로 알려져 있다[3,4]. 그 밖에 부품의 내구성(내마모성)과 관련된 특정 수준 이상의 인장 특성(tensile properties) 및 내마모성(abrasion resistance), 그리고 표면 조도(surface roughness) 등의 특성이 요구된다.

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소

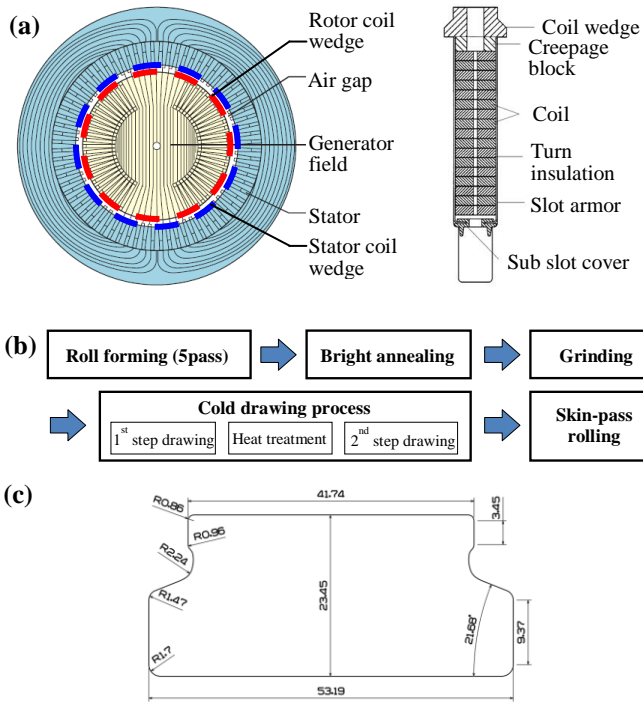
2. 포항산업과학연구원

3. ㈜광진실업

# Corresponding author : Korea Institute of Materials Science,

E-mail: ksl1784@kims.re.kr, ORCID ID: 0000-0002-4378-7902

회전체용 슬롯 구성품을 Fig. 1(a)에 나타내었고, 국내 업체에서 코일 웨지 제조에 적용하고 있는 공정도 및 2차 인발된 제품의 단면도를 Fig. 1(b)와 (c)에 각각 나타내었다. 본 연구에서는 기존에 사용하고 있는 냉간 인발 공정의 유한요소해석을 수행하였고, 2차 인발품의 자성체 분율 및 표면 잔류 응력 등을 측정하였다. 해석 결과와 실험 결과를 바탕으로 자성체 분율과 표면 잔류 응력을 감소시킬 수 있는 새로운 냉간 인발 공정을 설계하였으며, 설계된 인발 공정을 적용한 부품의 특성을 분석하여 기존 인발품과 비교하였다.



**Fig. 1** (a) Slot configuration of generator field including coil wedge  
 (b) Process flowchart for coil wedge production  
 (c) Cross-sectional view of coil wedge

## 2. 냉간 인발 기존 공정 분석

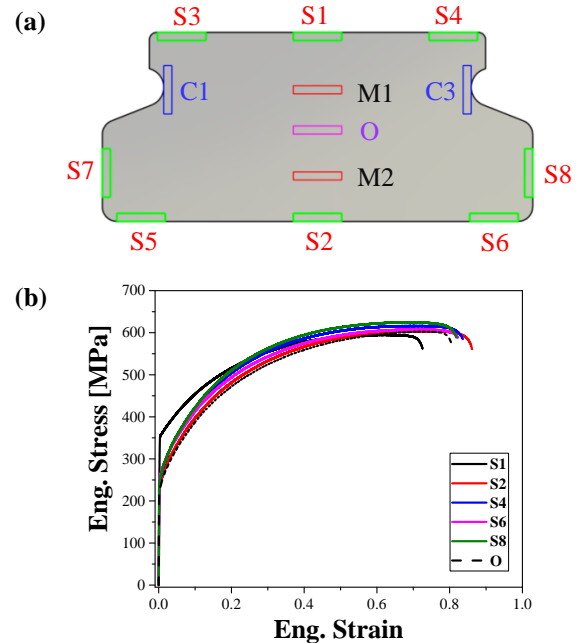
### 2.1 다이스 및 피인발 소재 특성 분석

냉간 인발 기존 공정의 유한요소해석을 위해 먼저, 각 단계의 단면적 감소율을 얻고자 하였다. 형상 압연된 시편과 1차 및 2차 인발 다이스의 단면을 3D 스캔하여 각 차수에 적용되는 단면적 감소율을 산출하였고, 결과를 Table 1에 나타내었다.

**Table 1** Cross-sectional area at each drawing step

	Measured area(mm <sup>2</sup> )	R.A(%)
After shape rolling	1342.251	-
1 <sup>st</sup> step drawing	1259.841	6.14
2 <sup>nd</sup> step drawing	1123.369	10.83

다음으로 유한요소해석에 사용될 피인발 소재의 특성을 얻기 위해, 1차 인발 후 광휘 소둔 열처리 (bright annealing)를 적용한 부품에 대해 인장 시험을 수행하였다. 피인발 소재는 SUS304N이며, 인발품의 각 위치에서 표점 거리가 25mm인 판상 시편을 채취하여 ASTM E8M에 따라 인장 특성을 산출하였다. 시편은 Fig. 2(a)에서와 같이 1차 인발 중 가공 경화의 정도가 클 것으로 예상되는 표면 10지점과 비교적 많은 변형이 일어나지 않은 중심부 3지점에서 채취하였다. 이 중 대칭을 가정하여 표면 5지점, 중심부 1지점의 유동응력곡선을 Fig. 2(b)에 나타내었다. 인장 시험 결과 S1을 제외하면 위치에 따른 인장 특성의 차이는 거의 없으며, 이를 통해 1차 인발 후 광휘 소둔 열처리 적용 시 소재의 특성이 초기 피인발 소재와 유사하게 회복됨을 유추할 수 있다.



**Fig. 2** (a) Location of tensile specimen from the material before 2<sup>nd</sup> step drawing  
 (b) Flow curves from various sample locations in the material before 2<sup>nd</sup> step drawing

**Table 2 Tensile properties from various locations in the material before 2<sup>nd</sup> step drawing**

	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)		YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)
S1	355.1	595.3	72.5	S8	254.9	625.0	81.8
S2	235.5	604.3	86.2	C1	233.4	606.9	83.9
S3	236.9	612.7	82.3	C3	233.8	598.6	86.5
S4	247.2	616.6	83.6	M1	235.0	596.6	86.0
S5	239.4	613.2	86.4	M2	232.9	586.7	83.0
S6	262.3	608.2	82.2	O	227.3	603.3	80.3
S7	245.0	621.1	80.4				

## 2.2 기존 공정의 유한요소해석

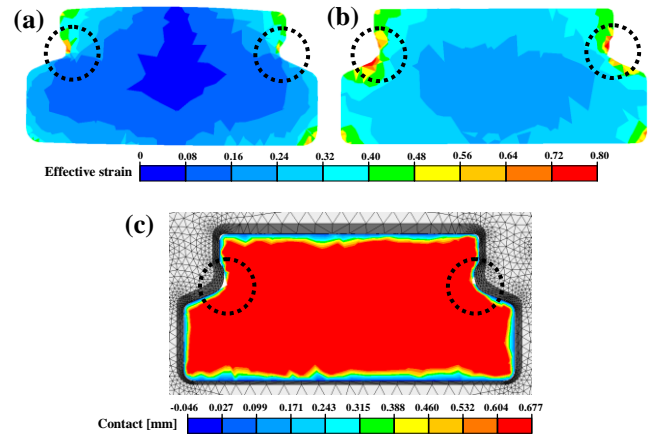
피인발 소재의 특성과 각 차수의 단면적 감소율을 이용하여 유한요소해석을 Table 3의 조건에서 진행하였다. 해석에 사용한 소재의 유동응력곡선은 부품의 중심에서 얻은 데이터를 사용하였다. 해석 결과 중 부품의 진직도 및 치수 정확도와 관련이 있는 1차 주응력(first principal stress) 분포, 단면 내 변형률 분포(effective strain distribution) 및 2차 인발 후 단면 형상(contact distribution)을 분석하였다.

**Table 3 Condition in FEM modeling for 2-step drawing**

	Condition
Problem definition	3D full model
Element size	2 mm
Drawing speed	100 mm/sec.
Billet temperature	20°C
Die temperature	20°C
Coulomb's friction coefficient	0.10
Constant shear friction	0.20
Heat transfer coefficient bet. billet and dies	2000 W/m <sup>2</sup> K

각 인발 공정에서 인발품 단면의 변형률 분포를 Fig. 3(a)와 (b)에 나타내었다. 변형률 분포는 전반적으로 좌우 대칭으로 형성되어 있으며, 일부 모서리 부분에서 반복적으로 미세한 비대칭이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 변형률이 비대칭인 부분에서 인발품 형상이 다이스 단면의 형상과 다소 상이할 가능성이 있음을 의미한다. 이에 2차 인발 부품에

대한 단면 형상을 다이스의 단면 형상과 비교하여 Fig. 3(c)에 나타내었다. 변형률 분포가 비대칭인 부분에서 소재가 채워지지 않은 영역이 발생하였으며, 이는 부품의 치수 정확도 향상과 교정의 용이성을 위해 개선되어야 할 사안으로 판단된다.



**Fig. 3 (a) Effective strain distribution after 1<sup>st</sup> drawing  
(b) Effective strain distribution after 2<sup>nd</sup> drawing  
(c) Contact distribution after 2<sup>nd</sup> step drawing**

2차 인발품 표면에 작용하는 1차 주응력 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 인발품 상단 중앙에서의 1차 주응력 값과 하단 중앙에서의 1차 주응력 값을 각각 시작점과 종착점으로 하여 시작점부터 종착점까지의 해석 결과를 나타내었으며, 주응력 분포의 대칭을 가정하여 오른쪽 절반의 결과만 표기하였다. 그래프에서 삼각형으로 표기한 두 부분은 1차 주응력이 높게 나타난 위치로, 인발 공정 후 잔류 응력이 높고 해당 부위의 진직도를 떨어뜨릴 가능성이 있다. 또한, 변형으로 인한 마르텐사이트 변태(deformation-induced martensitic transformation)로 비자성 특성을 잃을 가능성도 있다[5,6]. 반면, 사각형으로 표기된 부분은 낮은 1차 주응력을 보이는 것으로, 인발 공정 시 해당 부위에 소재가 채워지지 않을 가능성이 높다.

유한요소해석 결과로 볼 때 기존 공정은 일부 모서리에서 1차 주응력을 낮춰야 할 필요가 있으며, 동시에 특정 부위에 반복적으로 소재가 채워지지 않는 문제를 해결할 필요가 있다. 이를 위해 1차 인발에서 높은 단면적 감소를 유도하고, 2차 인발에서는 가급적 단면적 감소율을 낮추는 방향으로 인발 공정을 재설계해보았고, 결과를 3장에 나타내었다.

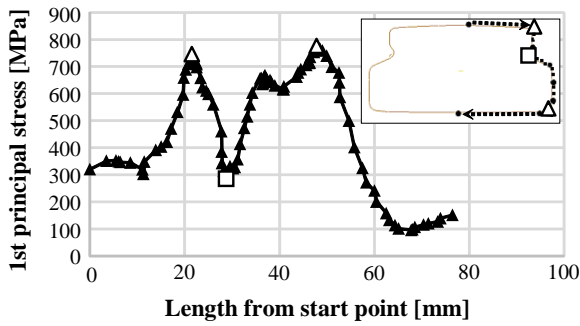


Fig. 4 Distribution of the 1<sup>st</sup> principal stress around surface of the 2<sup>nd</sup> step drawn product

### 3. 인발 공정 재설계

#### 3.1 재설계 공정의 유한요소해석

광휘소둔 열처리 후 소재의 특성이 대부분 회복되는 점과 유한요소해석 결과를 바탕으로 인발 공정을 재설계하였다. 재설계 공정에서는 1차 인발 시 높은 단면적 감소율을 적용하여 가급적 최종 인발품과 유사한 형상을 얻도록 유도하고, 2차 인발에서 낮은 단면적 감소율을 적용하여 최종 인발품에 높은 진직도, 비자성 특성, 낮은 잔류응력 등을 부여하고자 하였다. 각 인발 공정에 적용할 단면적 감소율을 아래 Table 4와 같이 산정하였고, 재설계 공정 A와 B에 대한 유한요소해석을 진행하였다. 선행 연구와 같이 다이스 단면 프로파일 전체에 대한 재설계를 수행하지는 않았으며[7-9], 베어링 부(bearing zone) 변경에 따른 베어링 부와 접근 부(approach zone)를 잇는 연결만 선형 보간으로 변경하였다.

해석에 사용된 조건은 기존 공정에 적용한 조건과 동일하며, 해석 결과 중 인발 공정에 따른 단면 내 변형률 분포를 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다. 왼쪽

과 오른쪽 변형률 분포도는 각각 1차 인발, 2차 인발 후 단면 내 변형률 분포를 의미한다. 설계 안 A의 단면 내 변형률 분포는 거의 대칭을 이루고 있으며, 2차 인발품 모서리 일부에서 약간의 비대칭을 보이고 있다. 반면 설계 안 B의 경우, 1차 인발품 단면 대부분의 모서리에서 비대칭적인 변형률 분포를 보이고 있다. 이에 따른 문제점은 Fig. 5(c)에서와 같이 일부 모서리 주변에 소재가 채워지지 않는 현상이 발생하는 것이다.

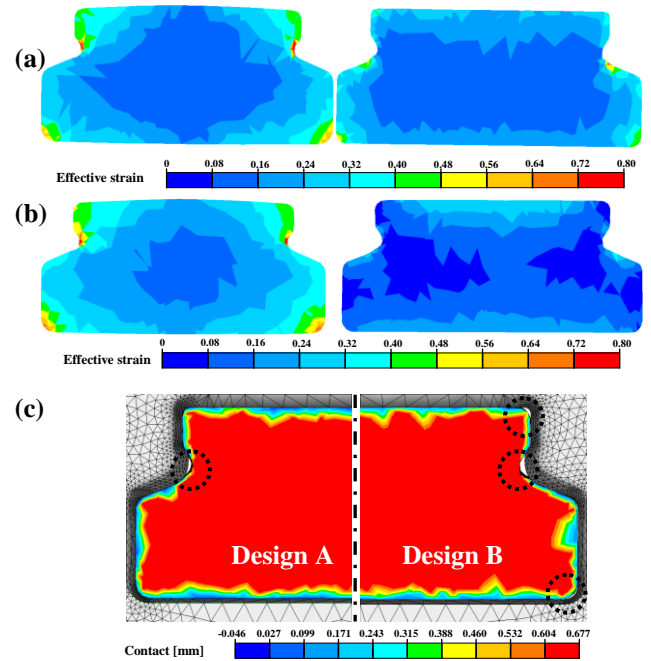


Fig. 5 (a) Strain distribution after applying design A (b) Strain distribution after applying design B (c) Contact distribution after applying design (left) A and (right) B

Table 4 Cross-sectional area and related reduction of area for the design A and design B

	Process	Measured area(mm <sup>2</sup> )	Reduction of area(%)
-	After shape rolling	1342.251	-
Design A	1 <sup>st</sup> step drawing	1220.072	9.10
	2 <sup>nd</sup> step drawing	1123.369	7.92
Design B	1 <sup>st</sup> step drawing	1180.039	12.09
	2 <sup>nd</sup> step drawing	1123.369	4.80

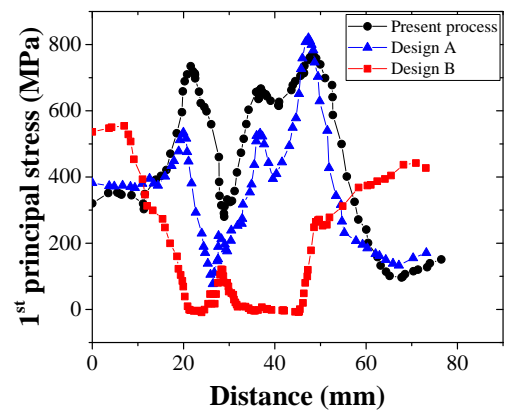


Fig. 6 Distributions of the 1<sup>st</sup> principal stress for the design A, B, and present process

공정 조건에 따른 2차 인발품 표면에서의 1차 주응력을 Fig. 4와 동일한 위치에서 기록하여 Fig. 6에 나타내었다. 재설계 안 A 적용 시, 부품 표면에서 기존보다 낮은 1차 주응력 분포를 나타내고 있으며, 특히 약 21mm, 36mm 위치에 해당하는 모서리 부에서 높게 나타났던 1차 주응력이 크게 낮아진 것을 확인할 수 있다. B에서도 전반적으로 낮은 주응력 분포를 보이고 있으나, 거리가 약 31~45mm 영역에서 주응력이 거의 작용하지 않는 문제를 보이고 있다. 이는 해당 부위에 소재가 채워지지 않았음을 의미하며, 최종 인발품의 형상 정확도를 떨어뜨린다.

유한요소해석 결과를 바탕으로 재설계 공정 A를 최종 공정으로 선택하여 실증해 보았고, 인발 부품의 여러 가지 특성을 평가하여 기존 인발 공정 적용품과 비교해 보았다.

### 3.2 기존 인발품 및 재설계 공정 적용품 특성 비교

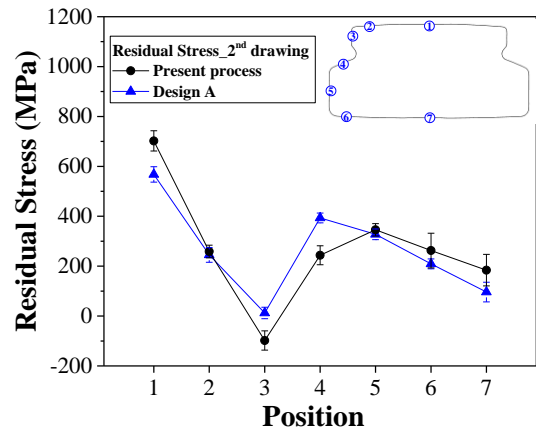
재설계 공정 A를 적용하여 코일 웨지 인발품을 제조하였고, 잔류 응력, 자성체 분율 등을 측정하여 기존 부품과 비교하였다. 최종 인발품의 단면적은 기존 공정과 설계 안 A에서 각각 1124.451mm<sup>2</sup>, 1124.485mm<sup>2</sup>로 거의 유사하며, 다이싱 형상 대비 소재가 채워지지 않은 영역도 각각 -0.096%, -0.099%로 매우 낮아 설계 안 A의 형상 정확도에 문제가 없음을 알 수 있다.

재설계 공정을 적용한 인발품의 인장 시험을 Fig. 2(a)와 동일한 위치에서 시편을 채취하여 수행하였고, 인발 공정 변화에 따른 물성의 감소 여부를 확인하였다. Table 5에서와 같이 새로운 설계 안을 적용한 부품의 인장 특성은 기존 공정을 적용한 부품에 비해 강도는 다소 낮으며 연신율은 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 기존 특성과 비교하여 감소량이 크지 않아 코일 웨지에 요구되는 항복 강도(450MPa 이상) 조건을 충분히 만족할 수 있음을 알 수 있다.

다음으로 인발품 위치에 따른 인발 방향의 잔류 응력을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 표면 잔류 응력은 X-ray 회절 방법을 이용한 X-Stress 3000을 사용하여 측정하였으며, 상단 중앙부를 1번 위치, 하단 중앙부를 7번 위치로 설정하였다. 3, 4번 위치를 제외하고는 전반적으로 설계 안 A에서 낮은 표면 잔류 응력을 나타냈으나, 차이가 크지는 않았다.

**Table 5 Tensile properties of 2<sup>nd</sup> step drawn coil wedge for present process and design A**

	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)		YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)
	Present process				Design A		
S5	715	813	29.1	S5	644	769	35.2
S6	666	805	31.4	S6	638	764	36.2
S7	689	854	24.8	S7	734	825	27.7
S8	747	841	25.7	S8	703	798	31.4



**Fig. 7 Residual stress of cold drawn products with present process and design A**

Feritscope FMP30을 이용하여 10cm 길이의 인발품에서 표면 자성체 분율을 측정하였으며, 각 위치 별 100회의 측정 값을 평균하여 Fig. 8에 나타내었다. 1~5번 위치에서 자성체 분율과 잔류 응력 변화 양상은 서로 유사하게 나타났다. 그러나 6, 7번 위치에서는 이러한 경향이 잘 맞지 않는데, 이는 2차 인발 과정 중 이 위치의 변형량이 높아 변형 유기 상변태를 일으켜 잔류 응력을 상당히 완화시킨 결과로 보인다. 실제로 XRD에 의한 잔류 응력 측정 중 6, 7번 위치에서 마르텐사이트 피크(peak)가 상당히 높게 나타났고, 자성체의 분율도 가장 높게 측정되어 상변태에 의해 잔류 응력이 완화되었다고 판단된다. 한편, 재설계 안 A는 기존 공정에 비해 전반적으로 낮은 표면 자성체 분율을 가지고 있으며, 이는 2차 인발 과정에서 부과된 단면 감소율이 기존 공정보다 낮아진 것에 원인이 있다고 할 수 있다. 또, 인발품 내부의 자성체 분율도 낮을 것으로 예상되어 인발품 단면에서 자성체 분율을 측정하였고, 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

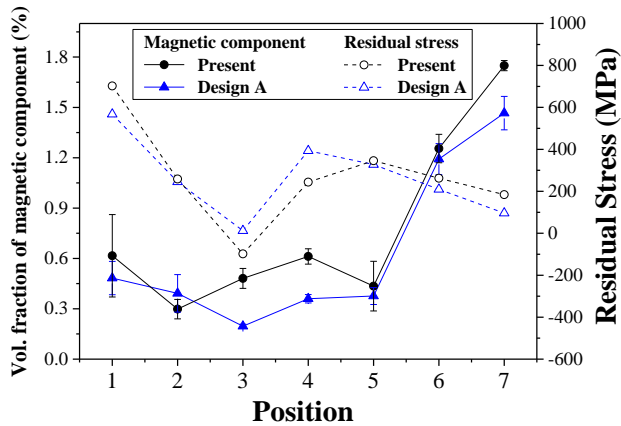


Fig. 8 Correlation between residual stress and volume fraction of magnetic component

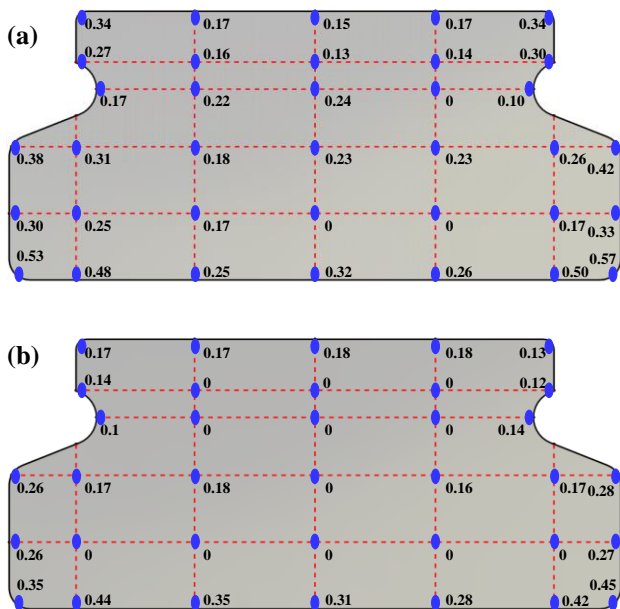


Fig. 9 Distribution of magnetic component in sectioned area for (a) present process (b) design A

대부분의 자성체는 표면 주변에 위치하고 있으며, 공정 조건과 관계없이 모두 좌우 측면 부와 하단 부에서 높은 자성을 띄는 것을 알 수 있다. 반면, 유한요소해석에서 반복적으로 소재가 채워지지 않았던 모서리 주변에서는 상대적으로 낮은 자성을 나타내고 있다. 재설계 공정을 적용한 인발품에서 상대적으로 낮은 자성을 나타내고 있으며, 특히 표면을 제외한 대부분의 단면 내부에서 자성 분율이 '0'으로 측정되어 기존 공정 적용품보다 우수한 비자성 특성을 보이는 것으로 판단된다.

따라서 재설계 공정 A를 적용함에 따라 기존 인발품과 유사한 형상 정확도, 인장 특성을 얻을 수 있었으며, 잔류 응력 및 비자성 특성은 기존 부품 대비 다소 개선된 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

발전기용 코일 웨지의 형상 정확도, 잔류 응력, 비자성 특성 등을 개선하고자 기존 인발 공정보다 1차 인발 시 높은 단면적 감소율을 부여하고, 2차 인발에서 낮은 단면적 감소율을 적용하는 새로운 냉간 인발 공정을 설계하고 적용하였다.

(1) 유한요소해석 결과 재설계 공정을 적용할 경우, 부품 단면 내 변형률 분포의 대칭성이 향상되며 일부 모서리에서 높게 나타난 주응력이 상당히 감소하는 것을 확인하였다.

(2) 재설계 공정을 적용한 인발품은 기존 공정을 적용한 인발품과 비교하여 유사한 형상 정확도 및 인장 특성을 나타내었다.

(3) 재설계 공정을 적용한 인발품은 인발 방향에서 기존 공정 적용품 대비 다소 낮은 표면 잔류 응력을 나타내었다.

(4) 인발품 표면에 존재하는 자성체 분율은 재설계 공정에서 상대적으로 낮게 나타났으며, 단면에서 측정된 내부 자성체 분율도 기존 공정에 비해 감소하였다. 특히 재설계 공정을 적용한 부품은 표면을 제외한 단면 내부에서 거의 자성을 나타내지 않아 상대적으로 우수한 비자성 특성을 보이는 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업 (Grant No. 10063258)의 지원으로 수행되었음.

## REFERENCES

- [1] Ronald J. Zawoysky et al., 2001, GE Generator Rotor Design, Operational Issues, and Refurbishment Options, GER-4212, GE Power Systems, pp.1~16.
- [2] MS7001(EA) Gas Turbine Technical Specifications, Chapter 7. Turbine-Generator, 91638G1, pp.7.23~7.29, [http://cfaspower.com/07\\_TurbineGen.pdf](http://cfaspower.com/07_TurbineGen.pdf).

- [3] P. S. Ko et. al., 2018, Process Map for Improving the Dimensional Accuracy in the Multi-Stage Drawing Process of Rectangular Bar with Various Aspect Ratio, *Trans. Mater. Process.*, Vol.27, No.3, pp.154~159.
- [4] S. K. Lee et. al., 2005, Process Design of Monobloc Tube for Steering Input Shaft in Cold Drawing, *Tran. Mater. Process.*, Vol.14, No.9, pp.779~784.
- [5] H. C. Shin et. al., 2001, Kinetics of Deformation Induced Martensitic Transformation in a 304 Stainless Steels, *Scr. Mater.*, Vol.45, No. 7, pp.823~829.
- [6] J. B. Jeon et. al., 2008, EBSD Study on the Evolution of Microstructures During Compressive Deformation of an Austenitic Stainless Steel, *Int. J. Mod. Phys. B*, Vol.22, pp.5971~5975.
- [7] S. K. Lee et. al., 2007, Die Design in the Complex Shape Drawing of Cross Roller Guide to Improve the Dimensional Accuracy, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol.21, No.10, pp.1573~1579.
- [8] S. I. Ji et. al., 2015, Process Design of Multi-Pass Shape Drawing of Wire with Asymmetric Trapezoid Profiles, *Trans. Mater. Process.*, Vol.24, No.3, pp.187~193.
- [9] S. K. Lee et. al., 2010, Development of Intermediate Die Shape Design Program for Multi-Pass Shape Drawing by Using VisualLISP, *Trans. Mater. Process.*, Vol.19, No.4, pp.242~247.