

제조공정에 따른 강종별 잔류응력 특성에 관한 연구; AISI 1536V, AISI A387

황성국*, 문정수*, 김한주*.#

*전북대학교 융합기술공학과

A Study on the Characteristics of Residual Stress in the Manufacturing Process of AISI 1536V and AISI A387

Sung-Kug Hwang*, Jeong-Su Moon*, Han Joo Kim*.#

*Department of Convergence Technology Engineering, Chon-buk National University

(Received 6 May 2020; received in revised form 13 June 2020; accepted 14 June 2020)

ABSTRACT

This study analyzes the residual stress of AISI 1536V for an engine shaft of the shipbuilding industry and AISI A387 for a reactor shell of the chemical refining industry by the hole drilling method with a strain gauge rosette, which transforms fine mechanical changes into electrical signals. Tensile residual stress is generated in the forging and heat treatment process because specimens are affected by thermal stress and metal transformation stress. In the heat treatment process, the residual stress of AISI A387 is almost 170% the yield strength at 402 MPa. Since during the machining process, variable physical loads are applied to the material, compressive residual stress is generated. Under the same condition, the mechanical properties greatly affect the residual stress during the machining process. After the stress-relieving heat treatment process, the residual stress of AISI A387 is reduced below the yield strength at 182 MPa. Therefore, it is necessary to control the temperature, avoid rapid heat change, and select machining conditions depending on the mechanical properties of materials during manufacturing processes. In addition, to sufficiently reduce the residual stress, it is necessary to study the optimum condition of the stress-relieving heat treatment process for each material.

Key Words : Residual Stress(잔류 응력), Heat Treatment Process(열처리 공정), Machining Process(절삭 공정), Hole Drilling Method(구멍 뚫기 방법)

1. 서 론

기술이 발전함에 따라 기계 구성 부품들의 강도와 품질 안정화 확보를 위한 기계적 성질과 정

밀성 향상이 요구되고 있으며, 이러한 요구 조건을 만족시키기 위해 제조 공정을 여러 공정으로 세분화하여 공정설계를 실시하고 있다. 열처리 공정(Heat Treatment)은 예비 열처리와 품질 열처리로 나누고, 절삭 가공공정(Machining)은 황삭 가공과 정삭 가공공정으로 세분화하여 제품 정밀성을 향상시킨다. 그러나 이러한 길고 복잡한 공정설계

Corresponding Author : khanjoo@jbnu.ac.kr

Tel: +82-63-472-2897, Fax: +82-63-270-4226

로 인해, 부품류에 치명적인 결함을 유발할 수 있는 잔류 응력(Residual Stress)이 제조 공정 중에 생성되어 균열(Crack), 표면 터짐(Surface Bursts), 비틀림(Twists) 및 변형(Deformation) 등의 주요한 원인이 되고 있다.

부품의 인장 강도(Tensile Strength)보다 큰 잔류 응력으로 인해 사용 중에^[1] 설계 수명 기간 전에 파단 되거나, 사용을 위한 대기 및 보관 중에도 파단에 이르는 경우도 있다. 제조 공정 및 조건에 따른 잔류 응력량을 측정하고 최소화 하려는 노력들이 진행되고 있으나, 아직까지는 잔류 응력에 대한 정확한 발생 배경, 요인분석 및 정량적 평가가 미흡한 상황이다. 이에 본 연구에서는 잔류 응력 발생 요인 및 제작 공정 변수^[2]에 따른 영향력을 고찰 하고자 한다. 기계 부품들의 전체 제작 공정중 각 공정 중에 발생된 잔류 응력을 조사하였고, 또한 열 영향을 많이 받는 단조, 열처리 공정과 절삭 공정인 황삭 가공 및 정삭 가공 공정에서 관리가 요구되는 공정 변수를 조사하였다. 금속화학 성분별, 열처리 종류별 및 기계적 성질에 따른 잔류응력 영향성을 연구하기 위해, 탄소강과 합금강 시험편을 각각 준비하였다.

잔류응력 평가 방법에는 기계적, 물리적 이완법이 있고 비파괴적인 방법인 음향파법이나 X-선 회절법^[3] 등이 있는데, 본 연구에서는 제품에 손상을 매우 국부적으로 발생시키는 기계적, 물리적 이완법인 구멍 뚫기 방법 (HDM, Hole Drilling Method)^[4]을 활용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시험편

시험편 제조 공정 중 발생하는 잔류 응력을 조사하였으며, 각 강종별 열처리 공정, 황삭 및 정삭 절삭가공 공정에 따른 잔류 응력 영향성을 연구하였다. 각 시험편의 기계적 성질(인장응력, 항복응력 및 표면 경도)과 절삭 공구 마모량에 따른, 잔류 응력 영향성을 분석하였고, 잔류 응력 완화를 위한 열처리 효과성 평가를 위해 강종별 시험편을 준비하였다. AISI 1536V는 선박 엔진 부품류 제작

Table 1 Chemical composition of materials (wt%)

Specimens	C	Si	Mn	P
AISI 1536V	0.41	0.22	1.12	0.009
AISI A387	0.14	0.16	0.53	0.004
Specimens	S	Ni	Cr	Mo
AISI 1536V	0.0006	0.027	0.14	0.004
AISI A387	0.0024	0.25	2.46	1.06

Table 2 Mechanical properties of materials

Specimens	MPa		%	
	T.S	Y.S	EL	ROA
AISI 1536V	670	404	25.3	54.6
AISI A387	568	402	32.6	78.8
Specimens	HB	Impact		
		Tem	Avg(J)	
AISI 1536V	197	20℃	24.1	
AISI A387	179	-30℃	245.5	

TS:Tensile Strength, YS:Yield Strength, EL:Elongation

용 소재로서 단조 후 870℃에서 노말라이징(Normalizing), 585℃에서 템퍼링(Tempering) 열처리를 실시하였고, AISI A387은 가혹한 사용 환경과 고온, 고압에 사용되는 화학 정제용 탱크를 제작을 위한 소재이다. 이러한 환경적 요구조건을 충족시키기 위해, 금속 화학성분 중 상당량의 크롬(Cr), 니켈(Ni), 몰리브덴(Mo)을 추가하였으며 940℃에서 퀘칭(Quenching), 730℃에서 템퍼링(Tempering) 품질 열처리를 통해 인장 강도를 낮추면서 저온에서도 높은 충격값을 갖도록 물리적 성질을 부여하였다. 강종별 금속 성분은 Table 1과 같으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

2.2 실험 장치

본 연구에서 잔류 응력 분석은 기계적 응력 측정 방식을 선정하여 실시하였으며, 이 방식 중에서 제품이나 시험편에 심각한 영향을 끼치지 않고

Table 3 Hole-drilling strain gauge

Classification	Model	Specification
1	Strain indicator	P3
	Bridge configuration	120Ω, 350Ω, 1,000Ω
	Measurement Accuracy	±0.1%
	Gauge factor control	Range : 0.5 to 9.9
	Shunt calibration	P-to D120 : 11.9KΩ±0.1%
2	Milling guide	RS-200
	Microscope tube	≤0.038mm
	Carbide cutter	Ø1.6mm
	X-Y adjustment	4 screws
3	Rosset (CEA XX 062UL 120)	120Ω ± 0.4%

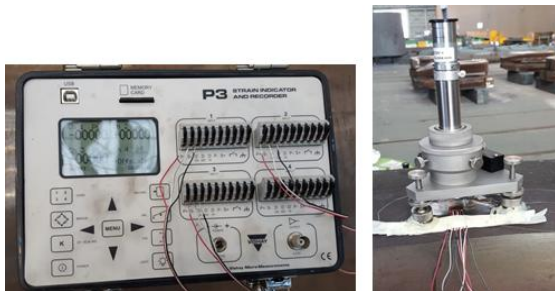


Fig. 1 P3-strain indicator and milling guide

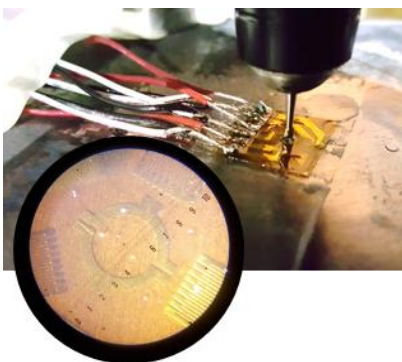


Fig. 2 Rosset-Strain gauge

Table 4 Machine specification for tool wear

Classification	Unit	Value
Table size	mm	3,900 x 750
Max. permissible load	Kg	4,000
Spindle drive power	Kw	11
Spindle speed	Rpm	18~1,300
Spindle taper	-	NT50
Longitudinal travel	mm	3,200
Cross travel	mm	1,000



Fig. 3 CNC Universal Milling Machine

손상을 매우 국부적으로 발생시키는 구멍 드릴링 스트레스 게이지 방식(Hole-Drilling Strain Gauge Method, HDM)^[5]을 적용하여 분석하였다. 이 방식은 Table 3과 같이 3가지 구성 요소로 이뤄져 있다. 스트레인 인디케이터(Strain Indicator), 밀링 가이드(Milling Guide) 및 로제트(Rosset)는 Fig. 1, Fig. 2와 같다.

잔류 응력에 대한 절삭 공구 마모량 영향을 연구를 위해, Fig. 3과 같은 유니버설 밀링기 (CNC bed type universal milling machine)을 사용하여 정삭 가공을 실시하였으며, 절삭력 영향성 평가를 조사하기 위한 측정 장치는 압전형 공구동력계 (Kistler, 9257B)와 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위해 멀티채널 전하 증폭기(Multi-Channel amplifier, Kistler, 5070A)를 사용하였다. 시험편의 기계적 성질 평가는 만능 시험기(Sham, SHM-C)를 사용하였으며, 금속 조직은 광학 현미경(Leica, DM1500M)을 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공정별 잔류응력

AISI 1536V 강종에 대한 단조, 열처리(Normalizing and Tempering) 후에는 Fig. 4와 같이 인장강도(TS, 670MPa)값과 유사한, 인장 잔류응력이 +658MPa까지 나타났다. AISI A387 강종에 있어서는 단조, 열처리(Normalizing) 후에는 Fig. 5와 같이 인장강도(TS, 568MPa)값 보다 높은, 인장 잔류응력이 +608MPa까지 높게 나타났는데^[6], 높은 가열온도에 직접적인 영향을 많이 받는 단조, 열처리 공정에서는 열응력으로 인한 잔류응력이 발생되었다. 표면 온도가 중심부보다 더 빠르게 냉각되면서 표면 부위에서는 수축이 일어나면서 인장 잔류응력 특성이 나타나고, 고온인 중

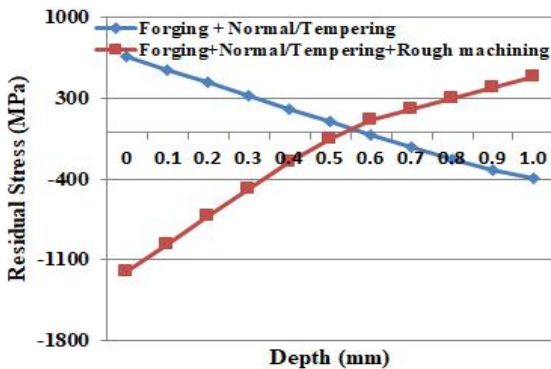


Fig. 4 Residual stress of AISI 1536V in manufacturing process

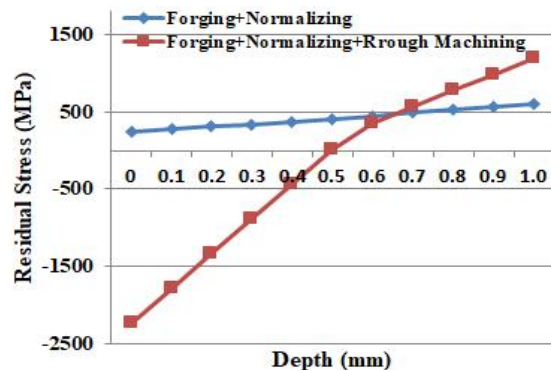


Fig. 5 Residual stress of AISI A387 in manufacturing process

심부는 외부 냉각에 의해 압축되면서 압축 잔류응력 특성이 나타났다.

황삭 절삭 가공공정에서는 소재 표면에 절삭 공구의 물리적 힘인 절삭력과 절삭 공구와 소재 표면 마찰에 의한 가공 열이 발생된다.

가공 중에 발생하는 열은 약 70~80% 정도가 칩(chip)으로 신속히 배출되면서 잔류 응력에 대한 열 영향력이 낮아지면서, 물리적 힘인 절삭력에 의해 압축 잔류응력이 발생되었다. 특히 AISI A387 강종은 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo) 합금 성분을 추가하여 기계적 성질은 향상^[7]되는 난삭성 재료 특성을 나타내면서, 황삭 절삭 가공공정에서 인장강도보다 약 400% 높은 -2,239MPa이 나타났으며, AISI 1536V에서는 -1,199MPa이 나타났다.

3.2 정삭가공 후 응력완화 열처리 효과

모든 강종의 정삭 절삭가공 이송거리가 1m, 3m, 5m 늘어남에 따라, 압축 잔류응력은 점차 높아지는 특성이 있다.^[8,9] 이렇게 발생된 잔류응력 완화 효과성을 분석하기 위한 잔류응력 완화열처리(Stress Relief Heat Treatment)를 각 강종별 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 실시하였다.

AISI 1536V에서는 내포된 잔류응력의 약 10~30% 정도 낮아지면서 -323MPa으로 항복 강도보다 낮아졌고, AISI A387에서는 약 60%까지 낮아지면서 -182MPa을 나타내었다. 잔류응력 완화열처리 온도는, 제조 공정에서 각 제품에 적용하는 온도보다 높지 않기 때문에 기존 잔류응력 형태를 변환시키지 않고, 잔

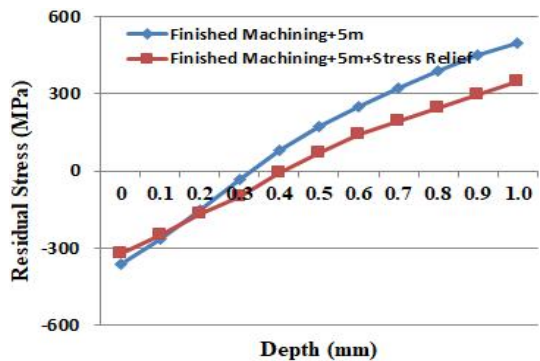


Fig. 6 Residual stress of AISI 1536V by stress relieving heat treatment

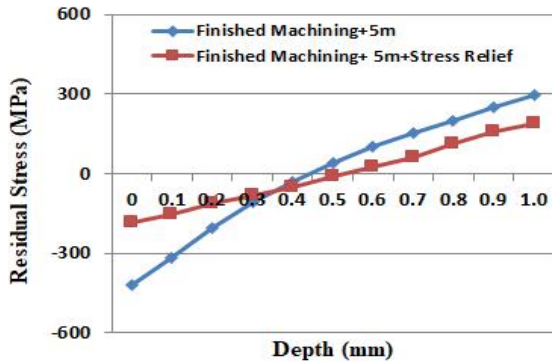


Fig. 7 Residual stress of AISI A387 by stress relieving heat treatment

류 응력값을 감소시키거나 제거한다.

3.3 플랭크 마모와 잔류응력 상관관계

초경 인서트 절삭공구를 사용하여 정상 절삭가공을 실시하여 이송거리에 따른 플랭크 마모량(Flank Wear)을 Fig. 8과 Fig. 9과 같이 측정하여 각 강종별 잔류응력에 대한 영향성을 분석하였다. 일반적인 절삭가공 공정에서는 압축 잔류응력이 발생되지만, AISI 1536V 소재 강도대비 너무 낮은 조건으로 절삭가공을 실시하여 소재 표면에 압축 잔류응력을 발생시킬 정도의 물리적 부하가 발생되지 않아서 절삭가공 이송거리 1m, 3m에서는 인장 잔류응력이 나타났고, 5m에서는 플랭크 마모량이 0.078mm까지 증가함에 따

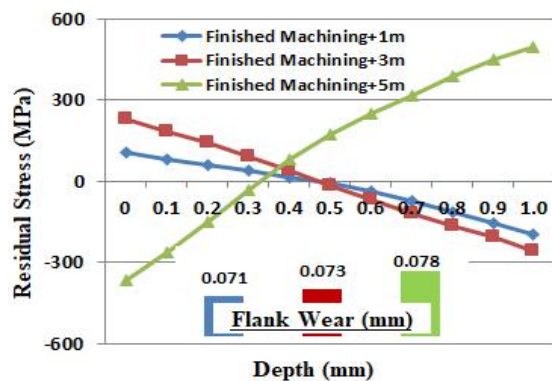


Fig. 8 Residual stress of AISI 1536V by flank wear of cutting tools in finished machining process, 1m, 3m and 5m

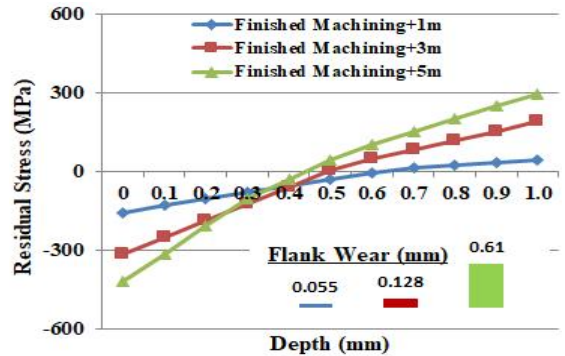


Fig. 9 Residual stress of AISI A387 by flank wear of cutting tools in finished machining process, 1m, 3m and 5m

라 압축 잔류응력이 급속히 증가하였다.

AISI A387은 3m 이상부터는 절삭공구 인선이 무더지면서 정상 공구 수명을 초과하는 플랭크 마모량이 0.128mm에서 0.61mm까지 증가하면서 더 이상 사용할 수 없는 수준까지 되었지만, 압축 잔류응력은 -318MPa에서 -419MPa로 완만히 증가되었다. 비록 항복 강도보다 높은 잔류응력이 발생되었지만, 플랭크 마모량이 일정 범위를 초과하면 잔류응력은 급격한 변화가 일어나지는 않는다.

3.4 표면 경도와 잔류응력 영향성

제조공정별 시험편 표면 경도를 측정하여, 잔류응력 영향성을 조사하였는데, Fig. 10과 같이 AISI A387 황삭 절삭가공 후 표면 경도가 327HB로 높게 나타나면서 -2,239MPa 압축 잔류응력이 발생되었고, AISI 1536V는 표면 경도 197HB일 때 압축 잔류응력 -1,199MPa이 발생되었다. 이때의 잔류응력이 시험편 표면 경도 특성으로 인해 발생되었는지, 황삭 절삭가공으로 인해 발생되었는지 명확히 구분되지 않아, Fig. 11과 같이 각 시험편별 열처리 실시 후 표면 경도를 측정하여 잔류 응력값을 비교하였다.

AISI 1536V 경우에는 열처리(Normalizing and Tempering) 후 표면 경도 185HB으로 인장 잔류응력 +658MPa이 발생되었으며, AISI A387 시험편에 대한 품질 열처리(Quenching and Tempering) 후 표면 경도 209HB일 때 인장 강도보다 높은 인장 잔류응력 +676MPa이 발생되었다. 즉 경도가 높을수록 잔류 응

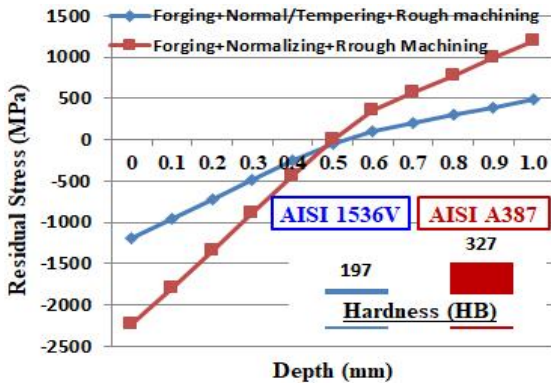


Fig. 10 Residual stress related with hardness of AISI 1536V and AISI A387 in rough machining process

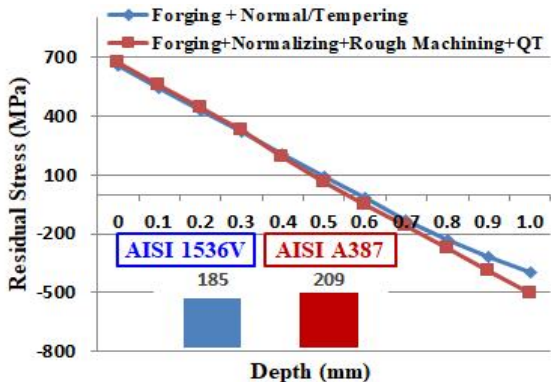


Fig. 11 Residual stress related with hardness of AISI 1536V and AISI A387 in heat treatment process

력이 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 산업분야에 적용되는 제품들의 제조 공정의 단조, 열처리 및 절삭가공 공정 등의 변수에 따른 잔류응력 영향성 평가 및 AISI 1536V 와 AISI A387 강종의 기계적 성질에 따른 잔류응력 영향성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 단조, 열처리 공정에서는 모든 시험편에 발생하는 잔류 응력은 열 응력과 금속 변태응력으로 인한 인

장 잔류 응력이 나타났다. 제품 표면 온도가 중심부 온도보다 빠르게 냉각됨에 따라 표면 부피가 줄어들면서 인장 잔류응력이 발생되었다.

2. 절삭 가공공정에서는 일반적으로 절삭 이송거리가 늘어남에 따라 압축 잔류응력이 발생되지만, AISI 1536V 의 절삭 이송거리 1m, 3m에서는 표면에서 0.5mm이상까지 인장 잔류응력이 발생되었다. 이것은 시험편 강도와 대비하여 물리적 부하가 낮은 절삭 조건으로 가공을 하므로 압축 응력이 발생되지 않고, 오히려 절삭가공 중에 발생하는 절삭열에 의한 인장 잔류응력이 생성되었다. 그러나 5m 이상에서는 절삭 공구의 플랭크 마모가 점차 증가되면서, 시험편 표면을 물리적으로 누르는 압축력이 증가되면서 압축 잔류 응력이 발생되었다.
3. 잔류응력 완화 열처리 실시 후, 모든 시험편 제조 공정 중 발생한 잔류응력을 항복 강도 이하로 감소시키지만, 잔류응력 형태는 변하지 않았는데, 잔류응력 완화 열처리 온도가 높지 않고 열에 노출되는 시간이 길지 않기 때문에 잔류응력 형태는 변화시키지 않고, 낮추거나 제거하였다. 잔류응력 완화 열처리 시 AISI 1536V는 530℃, AISI A387은 680℃에서 약 10Hr 가열 후 서냉시켜서 시험편의 기계적 성질 및 요구되는 금속 조직에 영향을 미치지 않도록 해야 한다.
4. 시험편에 대한 열처리를 실시할 때 고온으로 가열 후 빠르게 냉각되는 과정에서 금속 구조가 펄라이트(Pearlite) 또는 마르텐 사이트(Martensite) 조직으로 변태되면서 필요한 강도와 경도를 얻게 된다. AISI 1536V는 185HB으로 펄라이트 조직으로, AISI A387은 209HB으로 마르텐 사이트 조직으로 변태되면서 보다 높은 잔류응력이 발생되었다. 그러므로 오스테나이트 조직에서 급격한 금속 변태로 인한 마르텐 사이트 조직 보다는 잔류응력 발생량이 적은 베이나이트(Bainite) 조직을 얻기 위한 냉각 속도를 제어해야 한다.

REFERENCES

1. Vishay company, "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method," Tech Note TN-503, pp. 19-33, 2010.

2. Ko, S. K., "Study on the residual stress analysis and fatigue life of a steel plate with a cold expanded hole," Korea Society of Mechanical Technology, Vol. 18, pp. 177- 183, 2016.
3. M'Saoubi et al., "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316L steels," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 96, pp. 225-233, 1999.
4. Ronald B. Bucinell, Ph.D., P. E., "Calculating Principal Strains using a Rectangular Strain Gage Rosette," Union College 1 Department of Mechanical Engineering Schenectady, NY 12308, pp. 1-9, 2013.
5. An American National Standard "Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method," ASTM E837-01, pp. 1-10, 2001.
6. Vilhena, L. L., "Influence of heat treatment and machining parameters on residual stress field and Wear of double-layer cast rolls," Strojinski vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol. 56, pp. 260-266, 2010.
7. Lee, J. H., "A Study on the Cutting Characteristics of FCD500 for the Automobile Brake Components," Korea Society of Mechanical Technology, Vol. 20, No. 1, pp. 6-11, 2018
8. Madariaga, A., "Influence of tool wear on residual stresses when turning Inconel 718," 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI), Pro- cedia CIRP, Vol. 45, pp. 267-270, 2016.
9. Tang, Z. T., "The influence of tool flank wear on residual stresses induced by milling aluminum alloy," Journal of Materials Processing Technology 209, pp. 4502-4508, 2009.