

항공기 주익 조립 장비의 드릴링 성능에 관한 연구

홍성민*, 박대훈**, 한성길**, 송철기***,#

*경상대학교 대학원 기계융합공학과, **경상대학교 대학원 기계항공공학과, ***경상대학교 기계공학부,
공학연구원

A Study on the Drilling Performance of the Assembly Machine for the an Aircraft's Main Wings

Seong-Min Hong*, Dae-Hun Park**, Sung-Gil Han**, Chul-Ki Song***,#

*Department of Mechanical Convergence Engineering, Graduate School, Gyeongsang National Univ.,

**Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang National Univ.,

***School of Mechanical Engineering, ERI, Gyeongsang National Univ.

(Received 20 November 2017; received in revised form 27 November 2017; accepted 29 November 2017)

ABSTRACT

Recently, the manufacturing market for low-cost airlines has led to an increase in aircraft demand. Most processes in the production of these aircrafts are manual such as drilling, sealing, and swaging. A drilling and riveting machine is a numerical-control based equipment that automatically performs drilling, sealing, and swaging operations. The accuracy of the drilled holes and the exit burr length has a significant impact on the quality of the aircraft wing during assembly. This study was conducted to identify the conditions necessary to maintain a uniform quality by controlling the rotation speed of the spindle, which directly affects the hole diameter and the quality of the exit burr.

Key Words : Drilling and Riveting Machine(드릴링 및 리벤팅 장비), Hole Diameter(홀 직경), Exit Burr(출구 버), Process Capability(공정능력)

1. 서 론

최근 저비용항공사(LCC, low cost carrier)의 성장으로 인하여 중·단거리 노선의 운항이 늘어남에 따라 항공기의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 세계 민항기 시장 규모는 향후 20년간 신규 항공기 인도량이 38,050대에 달할 것으로 전망되기 때문에

관련 산업의 투자 및 성장도 같이 이루어질 것으로 예상된다¹⁻²⁾.

항공기 조립공정의 대부분의 공정이 수작업으로 이루어지다 보니 작업자의 능력에 따라 품질이 천차만별이며, 안정적으로 품질을 유지하기란 쉽지 않다. 특히, 조립공정에서 발생하는 불량률의 다수가 작업자의 실수에 의해서 발생하며, 이를 해결하기 위해서는 항공기 구조물의 안전성 검토를 수행하여야 한다. 따라서 조립공정에서 불량률 발생하면 공정에 추가적인 시간이 필요하며, 심각한 경우 제품

Corresponding Author : cksong@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1633, Fax: +82-55-772-1577

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 폐기해야 하는 문제가 발생한다.

수작업 공정의 문제를 해결하기 위해서는 자동화 장비의 도입이 필수적이며, 항공기 조립과정 중 드릴 작업(drilling)과 밀봉 작업(sealing), 스웨이징 작업(swaging)은 자동화가 가능하고 판단된다.

DRM(drilling and riveting machine)은 본 연구를 통하여 개발하고자 하는 장비로 Fig. 1과 같이 항공기 주익에 드릴 작업과 락 볼트(lock bolt) 체결작업을 자동으로 수행하는 장비이다. DRM을 이용하여 주익을 조립할 경우, 수작업 공정과 비교하여 높은 수준의 정밀도 및 품질의 제품을 생산하고 가격 경쟁력 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

이를 위해서는 DRM으로 드릴 작업을 수행할 때 홀의 정밀도가 확보되어야 하며, 드릴 작업과정에서 출구 버(exit burr)의 생성을 억제해야 한다. 홀의 정밀도를 높이고 출구 버의 생성을 억제하는 것은 다양한 산업에서 적용되는 사항이기 때문에 드릴 비트의 형상에 관한 연구를 포함하여 다양한 연구가 진행되었다³⁻⁷⁾.

항공 산업은 제품의 소재부터 가공, 조립과정에 대한 엄격한 관리를 수행하며, 제품을 가공, 조립하는 장비는 완제기 업체나 공인기관에 의해 인정받은 장비만 사용할 수 있다. 이에 따라 드릴 가공을 위하여 사용할 수 있는 비트의 종류가 제한적인 만큼 홀의 정밀도를 높이고 출구 버의 생성을 억제하기 위해서는 다른 방식의 접근이 필요하다.

본 연구에서는 괴링(Guhring Inc.)과 발터(Walter tools) 드릴비트에 대하여 스피들(spindle)의 회전수에 따른 홀 직경과 출구 버의 길이를 측정하고 공정능력(process capability) 분석을 통해 공정이 충분한 능력을 갖추고 있는 지 확인하고자 한다.



Fig. 1 Arrangement of DRM and main wing

2. 이론적 배경

2.1 6-시그마

일반 산업현장에서 제품의 품질수준을 확인하고 품질개선을 하여 6σ(six-sigma)를 많이 사용하고 있다. 6σ 방법론으로 DMAIC(an acronym for define, measure, analyze, improve and control)와 DMADOV(an acronym for define, measure, analyze, design, optimize and verify)의 두 가지 유형이 있다. DMAIC는 현존하는 공정이나 제품의 결함을 개선하기 위한 방법론이며, DMADOV는 새로운 공정을 처음부터 6σ 수준으로 설계하기 위한 방법론이다⁸⁾.

2.2 공정능력지수

공정능력이란 원하는 제품을 설계대로 생산할 수 있는 능력을 의미하며, 공정능력지수 C_p , C_{pk} 는 공정능력을 평가하기 위한 대표적인 지표이다⁹⁾. 이러한 공정능력지수는 무차원으로 공정의 성능을 정량화 하는데 도움을 주며, 공정의 변동을 설명하는데 있어서 많이 사용되고 있다¹⁰⁾.

C_p 는 제품의 품질변동이 어느 정도인가를 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 관리공차의 범위와 관찰된 표준편차(standard deviation)의 비를 통해 공정능력을 평가한다. 여기서 규격상한(USL, upper standard limit)은 관리공차의 상한 값을 의미하며, 규격하한(LSL, lower standard limit)은 관리공차의 하한 값을 의미한다.

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \quad (1)$$

분산(S^2 또는 σ^2 , variance)은 통계에서 평균으로부터 떨어져 있는 정도를 나타낸 값으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_n - \bar{x})^2 \quad (2)$$

C_p 는 공정의 산포만을 반영하고 공정평균(μ , process mean)의 위치는 고려하지 못한다. 즉, 모집단이 평균에 모일수록 C_p 값은 증가하지만 식 (3)의

규격상한과 규격하한의 중심 값인 공정중심(m)에서 떨어진 정도는 나타내지 못한다^[11].

$$m = \frac{USL - LSL}{2} \quad (3)$$

따라서, 관리공차의 중심에서 규격상한 및 규격하한의 방향으로 치우침이 있는 지를 평가하기 위하여 치우친 정도를 나타내는 상수 k 를 반영한 식 (4)의 C_{pk} 가 제안되었다^[12].

$$C_{pk} = (1 - k)C_p \quad (4)$$

식 (4)의 상수 k 는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{|m - \mu|}{\frac{USL - LSL}{2}} \quad (5)$$

만약, 공정중심과 공정평균이 동일하다면 C_p 와 C_{pk} 값은 같게 된다.

2.3 공정능력평가

6σ는 생산된 제품이 공정평균으로부터 표준편차의 6배에 해당하는 범위에 들어올 확률로 100만 개의 제품이 생산되었을 때 불량 제품이 0.002개 이하인 경우를 의미한다. 공정의 능력을 나타내는 σ 수준은 단기(short term)와 장기(long term)로 나누어진다. 단기 수준은 개선 효과나 현상변화에 대한 σ 산출을 구할 때 사용되고, 장기 수준은 긴 시간 동안의 안정성에 대한 수준을 나타낸다. 장기 수준의 σ는 단기 수준의 σ에 최대 1.5배를 고려한 값을 의미한다^[13]. σ 수준에 따른 C_{pk} 및 불량률의 관계는 Table 1과 같다.

3. 드릴링 시험 목적 및 방법

3.1 드릴링 시험 목적

드릴링 가공은 선삭이나 밀링과는 달리 드릴 공구 자체의 형상 및 절삭 조건과 칩이 나선 홈과 같

이 제한된 공간을 통해 배출 되는 복잡한 과정은 홀의 정밀도에 많은 영향을 미친다. 드릴 선단의 비대칭, 회전축의 편심 등 여러 가지 요인들이 홀 직경의 정밀도와 직진도를 저하시키는 원인이 된다.

항공기는 동체 및 날개 표면에서 돌출된 부위를 최소화하여 공기저항을 줄이고자 접시머리 형상의 락 볼트를 사용하고 있다. 이를 위해서는 드릴로 홀 가공을 한 후, 추가적으로 카운터 싱크(counter sink) 가공이 필요하다. 기존 수작업 공정에서는 작은 직경의 드릴 비트를 이용하여 중심을 잡은 후 드릴 비트의 직경을 키워가면서 홀의 직경을 확장시킨 후 카운터 싱크 가공과 버를 제거하는 디버링(deburring) 작업을 하게 된다^[14]. 이는 작업 목적에 따라 드릴 비트를 교환해야 되기 때문에 조립 과정에 필요한 시간이 증가하게 된다.

DRM은 홀 가공과 카운터 싱크 가공을 동시에 수행하여 가공 시간을 줄일 수 있는 스텝 드릴 비트(step drill bit)를 사용한다. 이 때, 홀 직경의 정밀도와 출구 버의 길이는 조립된 주익의 품질에 많은 영향을 미친다. 홀의 직경은 규격 상한과 규격 하한의 중심에 위치하는 것이 이상적이며, 출구 버는 최대한 생성되지 않는 것이 중요하다.

본 논문에서는 Fig. 2의 피링 드릴비트와 발터 드릴비트를 이용하여 드릴 작업을 수행하였을 때, 스펀들의 회전수에 따른 드릴 직경의 정밀도와 출구 버의 길이에 대한 공정능력 평가를 수행하고자 한다.

3.2 테스트 벤치 제작

드릴링 성능 시험을 위한 테스트 벤치는 Fig. 3과 같이 드릴 작업을 위한 스펀들과 락 볼트의 나사산에 따라 칼라를 가공하는 스웨이징 시스템을 실제와 유사하게 구성하여 시험 결과의 정확도를 향상시키고자 하였다.

스핀들은 서보 모터를 이용하여 정밀하게 위치제어를 하게 되며, 볼 스크류(ball screw), LM 가이드(linear motion guide)로 구성된 이송 조립체(transfer assembly)에 의하여 홀 중심 축 방향으로 이동이 가능하게 하였다.

Table 1 Index of defects related to sigma levels

Sigma (σ)	C_{pk}	Defect per million	
		Short term	Long term
1	0.33	320,000	>500,000
2	0.67	47,000	309,000
3	1.00	2,700	67,000
4	1.33	63	6,2000
5	1.67	0.57	230
6	2.00	0.002	3.4

Table 2 Specifications of spindle

RPM	Max	12,000
	Rating	9,000
Power (kW)		11.2
Torque (N·m)		12.7 (6,000 - 9,000 RPM)

항공기 주익의 스킨(skin)과 스트링거(stringer)의 접촉면을 구현하기 위하여 2장의 알루미늄 판재(AL 2027-T351)를 C-클램프로 시편 지그(coupon jig)에 고정하여 최대한 밀착시켰다.

3.3 드릴링 시험 방법

공학에서는 일반적으로 국제 단위계인 SI 단위계(international system of units)를 사용하지만 항공관련 산업은 미국을 중심으로 성장한 만큼 각종 사양을 나타낼 때 미국 단위계(U.S. customary units)를 사용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 드릴 직경을 나타내기 위하여 SI 단위계 대신 미국 단위계를 사용하고자 하며, 공기 주익 조립과정에서 가장 많이 사용되는 1/4 inch 및 5/16 inch 직경에 대하여 DRM 드릴링 시스템의 성능을 평가하고자 한다.

스핀들의 회전수는 드릴 작업을 수행할 때와 카운터 싱크 작업을 수행할 때에 대하여 각각 다르게 적용하였다. 먼저 스핀들이 초기 위치에서 작업 위치까지 다가가는 과정에서 스핀들의 회전수가 증가하게 되며, 회전수가 목표치에 도달하게 되면 드릴 작업을 수행하게 된다. 드릴 작업이 완료되게 되면 스핀들의 회전수를 드릴 작업의 절반으로 낮춘 후 카운터 싱크 작업을 수행하게 된다.

드릴링 성능 시험을 위한 테스트 벤치에 사용된 스핀들은 최대 토크 12.7 N·m, 최대 출력 11.2 kW이다. 드릴 작업을 위한 최소 토크는 6,000 RPM에서 발생하며, 정격 회전수는 9,000 RPM이다. 스핀들의 상세한 사양은 Table 2와 같다. 스핀들의 회전수는 드릴 작업을 위한 최소 토크가 발생하는 6,000 RPM부터 정격 회전수 9,000 RPM까지 1,000 RPM 간격으로 정하였다.



(a) Guhring drill bit



(b) Walter drill bit

Fig. 2 Shape of Guhring and Walter drill bit

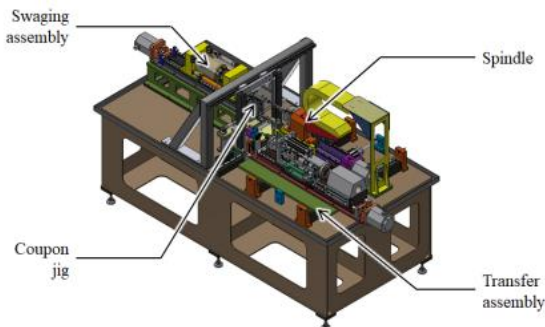


Fig. 3 Test bench for drilling test

Table 3 Standard limit of hole diameter and exit burr length

Diameter		Standard limit	
		Lower	Upper
1/4 inch	Hole	0.2445	0.2465
	Burr	0	0.002
5/16 inch	Hole	0.3070	0.3090
	Burr	0	0.002

4. 드릴링 시험 결과

4.1 1/4 inch 시험 결과

1/4 inch 드릴 비트에 대한 드릴링 시험 결과, Fig. 4와 같이 스피들의 회전수가 증가함에 따라 괴링 드릴비트의 평균은 규격 상한으로 접근하였으며, 발터 드릴비트의 평균은 규격 하한으로 접근하는 것을 확인할 수 있다. 괴링 드릴비트와 발터 드릴비트 모두 스피들의 회전수가 낮을 경우 홀 직경의 편차가 크며, 일부는 공정범위를 벗어나는 것을 확인할 수 있다.

Table 4에서 괴링 드릴비트는 스피들의 회전수가 9,000 RPM 일 때 홀의 직경과 출구 버의 길이가 기준을 만족하며, 발터 드릴비트는 전 영역에서 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 드릴 스피들의 회전수가 9,000 RPM 일 때, 발터 드릴비트가 괴링 드릴비트와 비교하여 공정 평균에 더 밀집되어 있지만 괴링 드릴비트의 공정 평균이 규격 중심에 더 가까이 위치하고 있기 때문에 C_{pk} 값이 높은 것을 확인할 수 있다.

출구 버의 길이는 스피들의 회전수가 증가함에 따라 괴링 드릴비트는 감소하며, 발터 드릴비트는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 스피들 회전수가 9,000 RPM 일 때 괴링과 발터 드릴비트가 발생시키는 출구 버 길이의 공정평균이 규격 중심 값으로 유사해지는 것을 확인할 수 있다.

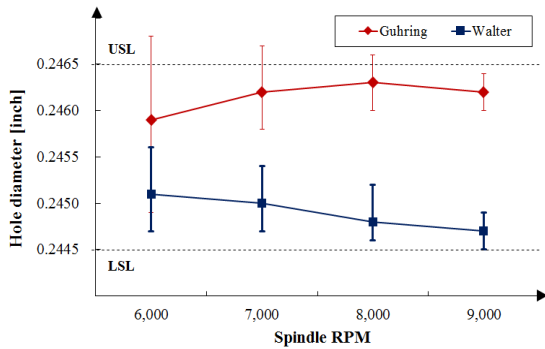


Fig. 4 Result of drilling test for 1/4 inch

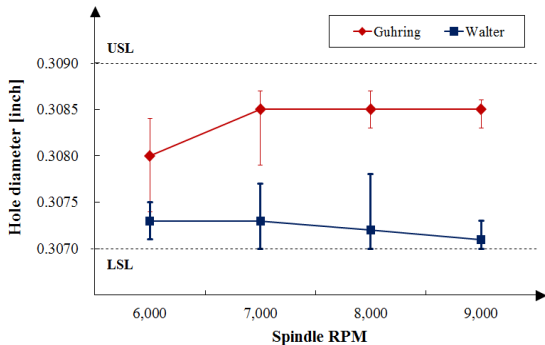


Fig. 5 Result of drilling test for 5/16 inch

두 가지의 스텝 드릴 비트에 대하여 드릴 작업을 수행한 후, 홀 직경과 출구 버의 길이를 측정하고 공정능력분석을 수행하고자 한다. 홀 직경과 출구 버의 길이의 공정기준은 Table 3과 같다.

4.2 5/16 inch 시험 결과

5/16 inch 드릴링 성능시험 결과, Fig. 5와 같이 홀 직경 측정값의 평균은 스피들의 회전수가 증가함에 따라 발터 드릴비트는 1/4 inch 직경과 유사하게 규격 하한 값으로 접근하지만 괴링 드릴비트는 0.3087 inch로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

Table 5에서 1/4 inch와 5/16 inch 괴링 드릴비트는 스피들의 회전수가 증가함에 따라 홀 직경의 정밀도가 향상되었으나 발터 드릴비트는 1/4 inch는 홀 직경의 정밀도가 증가한 반면에 5/16 inch는 7,000 RPM에서 오히려 정밀도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 4 Results of the process capability analysis for 1/4 inch diameter

Index	Spindle RPM								
	Guhring				Walter				
	6,000	7,000	8,000	9,000	6,000	7,000	8,000	9,000	
Hole diameter	Max (inch)	0.2468	0.2467	0.2466	0.2464	0.2456	0.2454	0.2452	0.2449
	Min (inch)	0.2449	0.2458	0.2460	0.2460	0.2447	0.2447	0.2446	0.2445
	Avg. (inch)	0.2459	0.2462	0.2463	0.2462	0.2451	0.2450	0.2448	0.2447
	C_p	0.63	1.33	2.11	3.39	2.17	2.51	2.84	3.75
	C_{pk}	0.45	0.48	0.41	1.03	1.29	1.21	0.82	0.84
Exit burr length	Max (inch)	0.0021	0.0023	0.0020	0.0016	0.0013	0.0014	0.0016	0.0017
	Min (inch)	0.0014	0.0012	0.0007	0.0007	0.0004	0.0004	0.0005	0.0006
	Avg. (inch)	0.0018	0.0017	0.0014	0.0011	0.0008	0.0009	0.0011	0.0011

Table 5 Results of the process capability analysis for 5/16 inch diameter

Index	Spindle RPM								
	Guhring				Walter				
	6,000	7,000	8,000	9,000	6,000	7,000	8,000	9,000	
Hole diameter	Max (inch)	0.3084	0.3087	0.3087	0.3086	0.3075	0.3077	0.3078	0.3073
	Min (inch)	0.3074	0.3079	0.3083	0.3083	0.3071	0.3070	0.3070	0.3070
	Avg. (inch)	0.3080	0.3085	0.3085	0.3085	0.3073	0.3073	0.3072	0.3071
	C_p	1.28	1.70	3.31	4.10	2.72	1.80	2.22	3.71
	C_{pk}	1.24	0.84	1.57	2.24	0.73	0.52	0.52	0.47
Exit burr length	Max (inch)	0.0022	0.0019	0.0021	0.0014	0.0009	0.0011	0.0018	0.0018
	Min (inch)	0.0003	0.0006	0.0006	0.0005	0.0002	0.0002	0.0003	0.0002
	Avg. (inch)	0.0012	0.0011	0.0012	0.0010	0.0006	0.0006	0.0009	0.0011

이는 다른 회전수에 비하여 홀 직경이 넓게 분산되어 C_p 값이 낮아지게 된 것으로 드릴 작업과정에서 공진현상으로 인하여 드릴비트의 떨림이 발생한 것으로 예상된다.

출구 버는 스피들의 회전수가 증가함에 공정평균이 공정중심과 유사해지는 것을 확인할 수 있다.

하지만 괴링 드릴비트의 경우 스피들의 회전수가 증가함에 따라 버의 길이가 공정평균에 밀집하는 것을 볼 수 있으나, 발터 드릴비트 공정평균에서 분산되는 것을 확인할 수 있다. 이는 스피들의 회전수가 증가함에 따라 발터 드릴비트는 출구 버의 길이를 예측하기 어려워진다는 것을 의미한다.

4.3 공정능력분석

1/4 inch 드릴비트의 경우, 스피들의 회전수가 증가함에 따라 두 종류의 드릴비트 모두 홀 직경의 C_{pk} 값이 증가하지만 C_{pk} 값은 피링 드릴비트만 증가하다. 이는 공정평균이 규격중심으로부터 멀어짐으로 인해 k 값이 증가하기 때문으로 두 종류의 드릴비트 모두 공정기준인 5σ 를 만족하지 못하였다.

5/16 inch 드릴비트는 피링 드릴비트의 경우 최소 2σ 수준을 확보하였으며, 8,000 RPM 이상일 경우 C_{pk} 값이 1.57로 항공기 자동화 공정의 기준인 5σ 에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

드릴링 시험 및 공정능력 분석결과, 5/16 inch 직경의 발터 드릴비트를 7,000 RPM으로 드릴 작업을 수행할 때 발생한 것으로 예상되는 공진현상을 제외하고는 대부분의 시험조건에서 C_{pk} 값이 낮게 나타난 것은 드릴 비트의 치수 문제로 추정된다.

따라서 C_{pk} 값을 향상시켜 위해서는 드릴 직경의 수정이 필요하며, 특히 피링 드릴비트는 추가적인 연마가공을 통하여 드릴비트의 직경을 수정하면 1/4 inch 드릴비트는 9,000 RPM에서 5/16 inch 드릴비트는 8,000 RPM에서도 충분히 5σ 기준을 만족할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 논문에서는 DRM과 동일한 구성의 테스트 벤치에서 2가지 드릴 비트에 대하여 스피들의 회전수에 따른 홀 직경의 정밀도와 출구 버 생성에 대한 분석을 하였으며, 연구수행 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 드릴링 시험을 한 결과, 두 드릴 비트 모두 스피들의 회전수가 높아질수록 홀 직경의 정밀도가 향상되었으며, 출구 버의 길이는 공정중심에 다가가는 것을 확인할 수 있었다.
2. 피링 드릴비트는 공정평균이 규격상한으로 치우쳐 있기 때문에 추가적인 연마가공을 통해 홀 직경의 정밀도를 높일 수 있으나 발터 드릴비트는 규격하한으로 치우쳐 있기 때문에 동일한 방

법으로 홀 직경의 정밀도를 향상시키기는 어려울 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지역신산업선도인력양성사업(NRF-2016H1D5A1910421)의 성과임

REFERENCES

1. Boeing, Orders & Deliveries, 2015.
2. Airbus, Airbus Annual Report, 2015.
3. Rou, H. J., "A Study on the Optimization of Drilling Operations(II) : Optimization Drilling Sequence Selection for Producing a Hole," IE interface, Vol. 12, No. 2, pp. 346-353, 1999.
4. Yang, H. J., Lee, J. H. and Seo, J. H., "Performance of Assembled-type Drills," Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 24, No. 2, pp. 238-243, 2015.
5. Ko, S. L., Bae, J. G. and Lee, J. K., "Analysis on Burr Formation in Drilling with New Concept Drill," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 114-121, 2000.
6. Kim, S. I., Choi, W. S., Son, J. H., Jang, E. S. and Lee, Y. M., "Analyses of Shear and Frictional Characteristics in Drilling Process," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 22-27, 2012.
7. Park, D. S. and Jeong, Y. H. "Study on Tool Wear and Cutting Forces by Tool Properties in CFRP Drilling," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 4, pp. 83-88, 2017.
8. Kim, G. S., "A Study on the Quality Management Performance through the 6-sigma

- Program,” Journal of the Korean Society for Quality Management, Vol. 27, No. 4, pp. 266-279, 1999.
9. Lee, C. H. “On the Confidence Region of Vector-valued Process Capability Indices C_p & C_{pk} ,” M.Sc Thesis, Chungbuk National University, 2002.
 10. Song, J. D. and Bae, H. S., “Control of PPM Level for High Quality Assurance,” Journal of the Korea Academic Association of Business Administration, Vol. 18, No. 18, pp. 217-233, 1998.
 11. Lee, K. K, Ro, Y. C., and Han, S. H., “Tolerance Optimization of Design Variables in Lower Arm by Using Response Surface Model and Process Capability Index,” Journal of Computational Design and Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 359-366, 2013.
 12. Lee, K. K., Park, C. K., and Han, S. H., “Six Sigma Robust Design for Railway Vehicle Suspension,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 33, No. 10, pp. 1132-1138, 2009.
 13. Lee, K. K., Park, C. K., Kim, G. Y., Lee, K. H., Han, S. W. and Han, S. H., “Solving Probability Constraint in Robust Optimization by Minimizing Percent Defective,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 37, No. 8, pp. 975-981, 2013.
 14. Bae, J. G. Park, H. Y. Kwon, B. C. and Ko, S. L., “Determination of Cutting Conditions for an Efficient Deburring Process Using a New Deburring Tool,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 109-117, 2016.