

유압 퀵 커플러 Ring부의 형상변경을 통한 최적설계에 관한 연구

이윤승*[§], 김남용*[§], 이도영**[§], 조용민***[§], 류성기*[#]

*경상국립대학교 기계항공공학부, **한국폴리텍대학 창원캠퍼스, ***천마기계(주)

A Study on the Optimal Design by Changing the Ring Shape of Hydraulic Quick Coupler

Yun-Seung Lee*[§], Nam-Yong Kim*[§], Do-Yeong Lee**[§], Yong-Min Cho***[§], Sung-Ki Lyu*[#]

*School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University,

Korea Polytechnic College Changwon Campus, *Chunma Machine LTD

(Received 06 December 2021; received in revised form 12 April 2022; accepted 19 April 2022)

ABSTRACT

Hydraulic coupling systems play an important role in easily connecting or disconnecting pipes or hoses that transmit high-pressure fluids without hydraulic oil leakage in hydraulic power transmission equipment. A flat-face hydraulic quick coupler is a recently developed product that can reduce environmental pollution by minimizing hydraulic oil leakage during connection and disconnection. In this study, the influence of the shape of the inner ring of a 3/8" flat-face hydraulic quick coupler on its internal flow characteristics was analyzed and evaluated by numerical analysis based on computational fluid dynamics. The flow velocity distribution, temperature distribution, and optimal shape design of the inner ring were obtained by comparing the results of the flow characteristics, such as the pressure drop.

Keywords : Flow Characteristic(유동 특성), Numerical Analysis(수치해석), Velocity Distribution(속도 분포), Flat-Face Quick Coupler(평면 접촉식 퀵 커플러), Pressure Drop(압력강하)

1. 서론

유공압 산업기계용으로 사용되는 유압시스템에서

는 펌프에서 토출되는 고압의 유압유가 Tube 배관을 통하여 액추에이터에 공급된다. 그리고 운전 중에 정비 등의 이유로 유압라인을 분리할 경우를 대비하여 부분적으로 유압호스를 설치하게 되고 이러한 경우에는 유압 커플러(coupler)의 사용이 필요하다. 이러한 이유로 유압 커플링 시스템은 유압 동력전달 장비에서 작동유의 누출없이 고압의 유체를 전달하는 파이프

Corresponding Author : sklyu@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1632, Fax: +82-55-772-1578

§ These authors equally contributed to this work as first author

또는 호스를 쉽게 연결하거나 분리하는 데 중요한 역할을 하고 있다. 그중 평면 접촉식 유압 퀵 커플러는 기존의 포켓형, 구면형 커플러에 비하여 연결 및 분리 시 작동유의 누출을 최소화하여 환경오염을 줄일 수 있는 최근에 개발된 제품이다.^[1-3] 하지만 평면접촉식 커플러의 복잡한 기하학적 형상구조는 유압 변속이 이뤄지는 동안 더 높은 에너지 소비로 이어지게 된다.^[4]

본 설계는 이러한 유압 동력 시스템의 압력손실 문제를 개선하기 위해 초점을 두었다. 유압기계에 널리 사용되고 있는 3/8" 평면 접촉식 유압 퀵 커플러 내부 링의 형상이 커플러의 내부 유동특성에 미치는 영향을 전산유체역학에 기반한 수치해석을 통하여 분석 및 평가를 하였다. 유압 퀵 커플러의 유속분포, 온도분포, 압력강하 등의 유동특성 결과를 비교하여 내부 가이드 핀의 최적 형상 설계를 얻는데 목적을 두었다.

본 연구에서는 전산해석을 기반으로 기존에 설계된 유압 커플러의 성능특성을 분석하여 주요 설계변수의 개선을 도모하였다. 설계모델에 있어서 커플러 내부의 형상변경을 통한 내부 유동장 해석을 수행하였다. 그리고 유압특성을 개선하는 방안을 파악한 후 2차 수정된 유로형상으로 압력강하를 예측하여 유압 커플러의 성능개선을 검증하는 순서로 진행하였다.

본 연구에서 사용된 전산해석 도구 및 모델링, 유동장 해석과 압력 특성은 상용 기계요소 설계 및 검증 소프트웨어인 Solidworks를 유압 커플러 내부 유동에 맞게 적용하여 최적설계를 수행하였다.

2. 평면 접촉식 유압 퀵 커플러 구조 및 연구방법

2.1 평면 접촉식 유압 퀵 커플러 구조

기존의 포켓(poppet)타입과 구형(spherical)타입의 커플러와 평면 접촉식(flat-face)타입의 커플러 이미지를 Fig. 1에 나타냈다. 기존의 포켓과 구형 타입의 커플러에서는 플러그와 소켓 사이에 잔여 공간이 발생함에 따라 오일의 누출에 따른 누유 현상이 잦은 것이 현재 실정이다.

누유의 문제점을 보완함과 동시에 누유로 인한 환경오염을 줄이기 위하여 기존의 포켓 커플러와 구형 커플러에서 평면 접촉식의 새로운 커플러 구조를 설

계하였다. 기존의 설계기술과 비교하면 평면 접촉식의 커플러는 유압기기와의 탈부착시 잔여 공간의 부재로 작동유의 누유현상을 최소화시킬 수 있는 친환경적 특성이 강조되었다.^[5-6] 이를 바탕으로 구조설계를 진행하였으며, 평면 접촉식 퀵 커플러의 내부 형상 구조 및 유동특성을 분석하여 설계변경을 통한 성능 개선을 수행하기 위해 수치해석을 진행하였다.

2.2 연구방법

유압 커플러가 갖추어야 할 조건에는 여러 가지가 있다. 시스템 내부의 유체가 누설되면 환경오염이나 유압 시스템의 결함을 가져올 수 있으므로, 유압 커플러는 분리가 되었을 때 파이프 내부의 유체가 밖으로 누설되지 않게 차단할 함과 동시에 연결이 되었을 때는 내부의 유체흐름이 자유롭게 이루어질 수 있도록 손실계수를 최대한 줄여야 한다.^[7]

또한, 고압에서 작동하는 부품이기에 내부응력 또한, 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 손실계수를 줄이는데 있어 압력강하를 낮추는데 초점을 두었다.

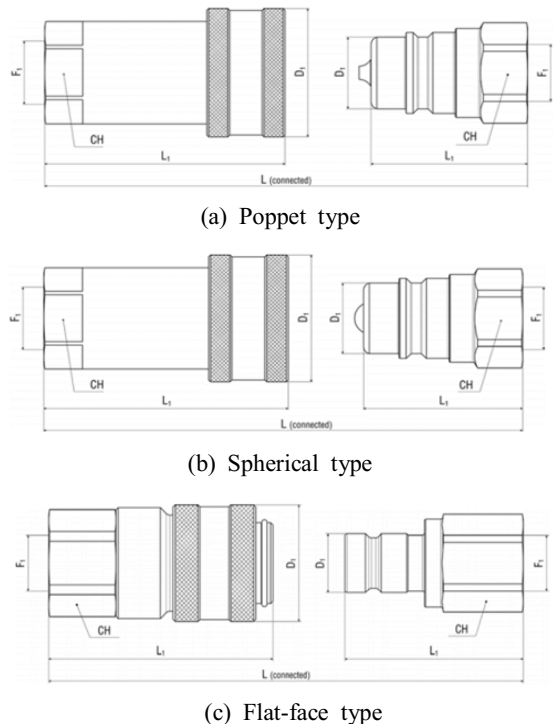


Fig. 1 Types of hydraulic quick coupler

접촉조건에 따른 벽과 유체의 마찰에 의한 압력강하 발생과 내부형상 구조에 따른 압력강하의 발생은 원활한 유압 라인의 연결을 방해하며 내부 유동흐름에 큰 저항을 주게 된다.

모든 실제 유체는 점성이 있으며 유체 흐름에 대한 저항을 발생시킨다. 따라서 두 섹션 사이의 유체 흐름에는 약간의 손실이 발생하게 된다. 베르누이 방정식은 유체가 비점성, 즉 마찰이 없다는 가정에서 파생되었으며 실제 유체에는 적용되지 않으므로 베르누이 방정식은 손실을 고려하여 수정하게 된다. 유압유에 대한 수정 베르누이 방정식은 다음과 같은 형태로 정리할 수 있다.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2}{2g} + h_L \quad (1)$$

여기서 1, 2는 커플러의 입구와 출구를 의미하며, h_L 은 커플러의 입구와 출구 사이의 에너지 손실인 손실수두를 나타낸다. 명료한 해석결과를 얻기 위하여 커플러 내부의 유동속도가 일정하다고 가정하였을 때 h_L 은 다음 식(2)의 형태로 정리할 수 있다.

$$h_L = K_1 \frac{V^2}{2g} + K_2 \frac{V^2}{2g} + K_3 \frac{V^2}{2g} + f_d \frac{d}{l} \frac{V_2}{2g} \quad (2)$$

여기서 K_1, K_2, K_3 는 커플러의 입출구 및 내부 형상변화에 의한 손실계수를 나타내며, f_d 는 커플러 내부의 유체마찰계수로서 유동상태가 층류와 난류일 때의 레이놀즈수에 의해 결정된다.

$$\Delta P = K_c \times \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3)$$

최종적으로 식(3)과 같이 커플러 내부의 압력강하 발생을 최대한 억제하기 위해 내부 유로의 체적과 균일하고 일정한 유동방향이 되게끔 형상변경 설계를 진행하였고, 최종적으로 수정 베르누이 방정식에 의한 압력강하식에 따라 커플러의 손실계수 K_c 는 감소함을 검증한다.

3. 평면 접촉식 유압 킥 커플러 구조해석 및 유동해석

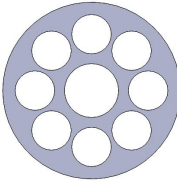
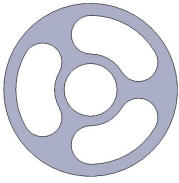
3.1 해석대상 및 모델

Table 1에서는 본 연구에 적용된 평면 접촉식 유압 킥 커플러의 내부유동흐름에 영향을 미치는 형상 중 Ring 부분을 나타내었다. 재설계한 Ring의 형상은 유동흐름이 원활히 이루어질 수 있도록 비교적 완만한 형상을 나타내면서 면적을 넓혀 유속을 낮춤과 동시에 난류가 발생하지 않도록 적절한 형상으로 재설계하였다.

Fig. 2에서는 평면 접촉식 유압 킥 커플러의 3D 모델링으로 구성된 내부 단면도의 각 섹션별 파트들을 나타내었다.

Fig. 3은 유동해석에 사용된 개선모델용 Mesh에서 실제 내부의 유체가 가지는 면적에 대한 각각의 셀을 의미하며 총 193,836개의 Mesh 중 고체와 접촉되는 유체 셀은 75,271개, 곡률 기준은 0.318rad로 구성하였다.

Table 1 Information of 2 kinds of ring design

	Modeling	
	Initial design	Modified design
Shapes		
Weight(g)	9.24	8.076
Area(mm ²)	1891.00	1619.82
Volume(mm ³)	1176.92	1093.35
Density(mm ³ /g)	0.01	0.008

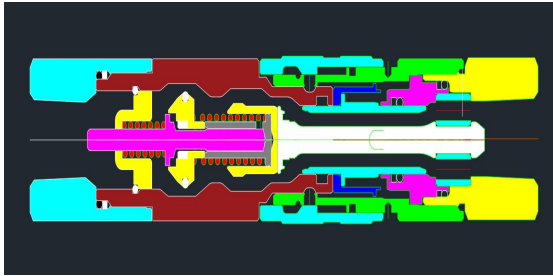


Fig. 2 Sectional view of quick coupler

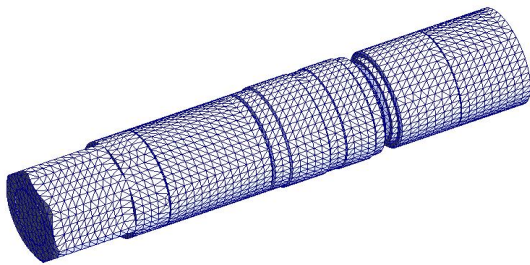


Fig. 3 Meshing for Solidworks simulation

3.2 평면 접촉식 유압 퀵 커플러 피스톤 구조해석

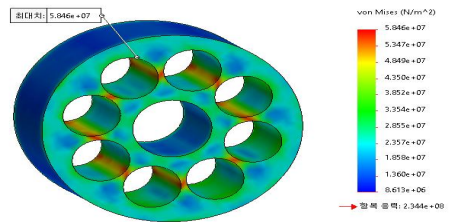
스테인레스 321L 소재의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 이는 구조해석을 진행할시 평균적으로 널리 사용되는 강화 스테인레스 강 AISI 321 소재를 적용하였고 각 상태량들이 외부조건의 영향없이 일정한 상태로 가정하여 진행하였다. Solidworks 구조해석 시 사용된 Boundary condition으로 30MPa의 내압을 ring부에 적용하여 기존의 Quick coupler에 대해 사용되는 정격사용압력을 확인하였다. Table 3은 ring부의 압력강하를 줄이기 위하여 기존의 형상과 재설계한 2가지 형상을 각 30MPa의 외압을 적용하여 해석한 결과이다.

Table 2 Stainless 321L properties

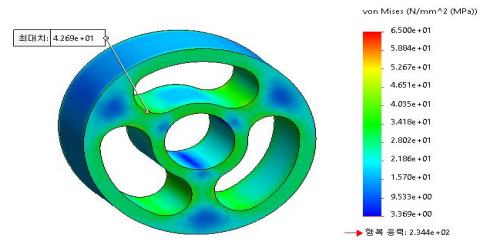
Properties	Metric
modulus of elasticity	1.929999974 N/m^2
Poisson's ratio	0.27
Density	8000.000133 kg/m^3
Tensile strength	619.999 N/mm^2
Yield strength	234.422 N/mm^2

Table 3 Maximum stress for 2 types of ring

	Initial	Modified
Features (ring)	General model	Fluid flow area at constant
Max. Stress	58.46 MPa	42.69 MPa



(a) Initial design



(b) Modified design

Fig. 4 Stress distribution at flow pressure of 35 MPa

Fig. 4에서는 초기모델과 재설계를 통한 개선된 모델에 대해 최대응력을 비교한 값이다. 30MPa의 외부압력이 작용할 경우 최대응력은 58.46MPa에서 42.69MPa로 개선되었음을 확인하였다. 이는 유로존의 면적이 증가함에 따라 응력이 고루 분포됨을 유추할 수 있다.

개선된 모델의 구조해석을 통한 안정성을 검증한 후 일반적으로 널리 사용되고 있는 초기모델의 Ring과 재설계된 Ring을 비교하여 내부 형상변경에 따른 유동 특성에 대해 분석을 수행하였다.

3.3 유압 퀵 커플러 유동해석

유동해석을 위해 사용된 소프트웨어로는 Dassault System의 Solidworks를 이용하였으며, 프로덕트로는 Flow simulation을 사용하여 평면 접촉식 유압 퀵 커플러 내의 유동해석을 진행하였다. 구성된 Mesh를 Solid

works를 이용하여 유동해석을 하였으며, 해석조건으로는 적용유체, Scale, Model, Boundary Condition 등을 부여하였다. 유동해석 시 사용된 유체로는 비뉴턴 액체 중 BASF 486M HIPS를 사용하였다. 밀도는 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ 이며, $1200\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 의 비열을 가지고, 열전도율이 $0.12\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 의 물성치를 가진다. Scale의 단위계는 실제 모델링 상태와 같게 하려고 [mm]를 적용하였다. Boundary Condition으로는 층류유동, 온도는 20.05°C 로 설정하였다. Table 4와 같이 입구와 출구사이의 압력강하를 중요변수로 입력하였고, 입구의 압력을 30MPa로 고정시키고 출구압력은 29MPa에서 25MPa까지 각 1, 3, 5MPa씩 변화시켜 측정하였다. 해석시마다 모든 조건들은 똑같이 적용하였고 해석 도중 결과값이 수렴하기까지의 데이터를 기록하였다. Table 4에서는 개선 전과 개선 후의 비교 결과이다. 30MPa의 입구압력과 25MPa의 출구압력의 차이에서의 비교 결과이며, 개선 전의 모델에 비해 재설계를 통한 최적화된 개선 후의 모델에서의 결과를 우수한 것을 확인할 수 있었다. 이후 개선된 모델의 속도와 압력, 온도분포, 내부 유동흐름에 대한 난류의 결과를 분석하였다. 층류 유동장에서의 Solid works를 이용한 유동해석 결과 Fig. 5에서는 내부 유동흐름에 대한 유선을 보여준다. 입구와 출구에서의 1~5MPa 압력차가 있음에도 동일한 흐름을 나타내었다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 압력차에 따른 내부 정압분포와 온도분포 결과이다. 속도 Contour에서는 Fig. 8과 같은 모습을 나타내었다. 전체 구간에서 유량이 동일할 때 연속방정식에 의해 입구와 출구에서 평균속도가 가장 느리게 나타났으며, Couper 중앙 우측에서의 속도가 가장 크게 나타났다는 것을 알 수 있다. 또한, 피스톤 일직선 부분에서 가장 큰 유속을 보였으며, 링의 모서리 부분 역시 빠른 유속을 보였다. 이는 압력강하가 증가할수록 유속이 급격하게 상승함을 알 수 있다.

Table 3 Results at pressure difference of 5MPa

	Initial	Modified
Inlet velocity	0.003 m/s	
Outlet velocity	0.0072	0.0066 m/s
Inlet temperature	20.05 °C	
Outlet temperature	24.89	24.22 °C

Table 4 Boundary conditions for flow simulations

Inlet(MPa)	Outlet(MPa)	$\Delta P(\text{MPa})$
30	25	5
30	27	3
30	29	1

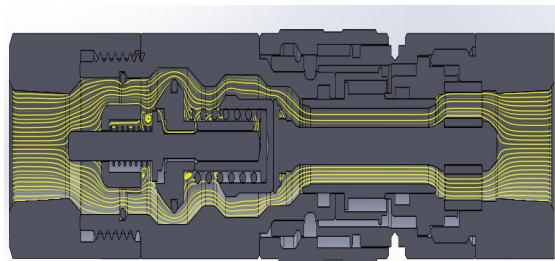
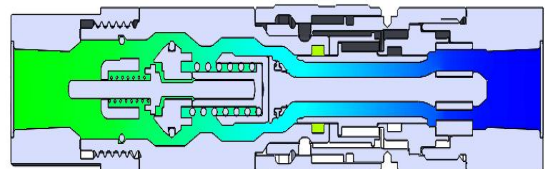
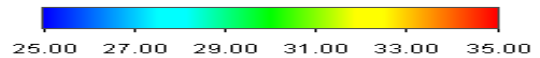
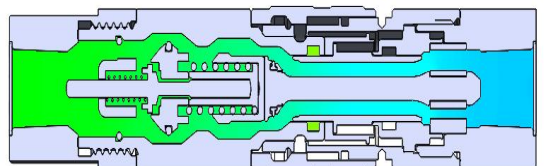


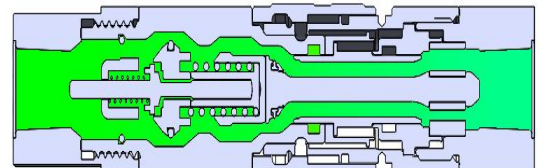
Fig. 5 Results of streamline



(a) $\Delta P=5\text{MPa}$



(b) $\Delta P=3\text{MPa}$



(c) $\Delta P=1\text{MPa}$

Fig. 6 Results of static pressure contour

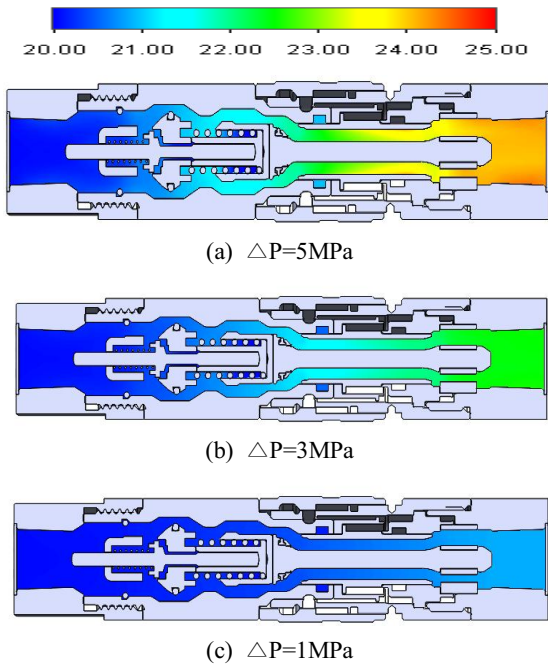


Fig. 7 Results of temperature contour

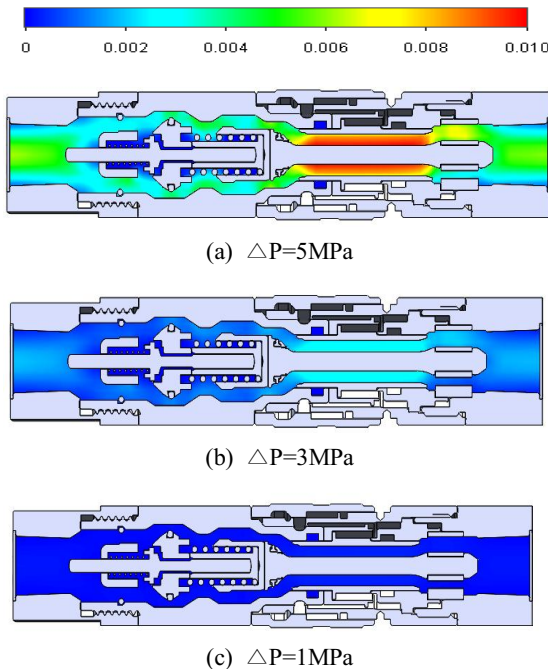


Fig. 8 Results of velocity contour

4. 결론

본 연구는 일반적으로 널리 사용하는 산업용 수치를 적용하여 유체의 이송과 차단을 위한 3/8" 평면 접촉식 유압 퀵 커플러의 성능개선을 위해 수행되었다. 그리고 평면 접촉식 유압 퀵 커플러의 구조해석 및 유동해석을 통해 내부 Ring부의 형상변경에 따른 유동특성을 분석하여 최적화된 설계 데이터를 도출하여 타당성을 검토하였다.

1. 평면 접촉식 유압 Quick coupler에 대하여 Ring부의 형상변경 전과 변경 후의 구조해석을 통한 동일한 내압이 부여될 때 파괴 압력에 따른 응력의 분포와 최대응력값을 확인하였다.
2. 1MPa에서 5MPa로 양 끝의 압력차를 증가시켰을 때 유량, 속도, 온도분포가 모두 점점 증가함을 확인하였다. 반면에 베르누이 방정식에 의한 압력강하식인 $\Delta P = K_c \frac{1}{2} \rho V^2$ 에 의하면 Coupler의 손실계수 K_c 는 감소했다는 것을 알 수 있다.
3. 퀵 커플러 Ring부를 평면접촉식으로 개선하였을 때 속도분포에서의 변화가 가장 뚜렷하였다. 입출구의 압력강하에 따른 내부 유속은 증가함을 보였으며, 유로존의 면적과 내부 압력은 반비례 관계에 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 산학연 Collabo R&D 사업화R&D(2단계) 사업(과제번호 : S3096431) 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Wu, Y. T., Qin, Z., Eizad, A., Lyu, S. K., "Design and Numerical Simulation-Based Optimization of a Novel Flat-Face Coupling System for Hydraulic Power Equipment", Applied Sciences, Vol. 388, No. 11, pp. 1-25, 2021.
2. Qin, Z., Wu, Y.-T., Kim, D.-S., Kim, S.-B., Lyu, S.-K., "Study on Design of Hydraulic Pump with High Temperature and High Pressure Resistance for

- Cable-Stayed Bridge", Master's thesis in Korea, Department of Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 11, pp. 109-114, 2019.
3. Kim, N. Y., Wu, Y. T., Qin, Z., Choi, Y. M., Lyu, S. K., "A Study on the Optimal Design According to the Piston Shape of the 3/8 Hydraulic Quick Coupler", Department of Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 66-71, 2021.
 4. Wu, Y. T., Qin, Z., Eizad, A., Lyu, S. K., Lee, C. M., "Numerical Investigation of Flow Characteristics in a Viscous Damping System with Symmetrical Hydraulic Cylinders", International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 22, pp. 579-597, 2021.
 5. Wu, Y. T., Qin, Z., Eizad, A., Lyu, S. K., Lee, C. M., "Advancement of mechanical engineering in extreme environments" International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 8, pp. 1767-1782, 2021.
 6. Qin, Z., Wu, Y. T., Huang, A., Lyu, S. K., Sutherland, J. W., "Theoretical Design of a Novel Vibration Energy Absorbing Mechanism for Cables", Applied Sciences, Vol. 10, No. 15, p. 5309, 2020.
 7. Ahn, H. H., Yi, C. S., "Numerical Analysis of the Internal Flow of Small Quick Coupler at 3,000psi", Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 16~21, 2016.