

편심 원을 이용한 EDG 조속기의 기구학적 설계

신승훈*†

The Kinematic Design of EDG's Centrifugal Governor using an Eccentric Circle

Seunghoon Shin*†

Key Words : Eccentric circle(편심 원), Centrifugal Governor(조속기), Emergency diesel generator(비상 디젤 발전기), Kinematics(기구학), Cam profile(캠 형상)

ABSTRACT

This paper focused on kinematic design of EDG's centrifugal governor. The operation speed of EDG is controlled by centrifugal force from fly-balls. When the fly-ball moves along virtual circle geometry, operation speed of EDG is linearly controlled. But EDGs are installed to provide auxiliary power in an emergency situation, a faster start-up speed is required in reactor meltdown accident. And the EDG is not always operated, it is intermittently operated for monthly testing. Tooth wear and fatigue problem of power transmission gear can be caused by frequent start-up & stop. Therefore, new governor mechanism of EDG is suggested as a solution in this paper. If an eccentric circle geometry is used instead of a circle, it might be better method in terms of safety of nuclear plant and reliability of machine. In order to specify the eccentric circle geometry, the cam profile synthesis method is applied to EDG's governor and then the other links are connected, kinematically.

1. 서론

본 논문은 EDG(Emergency Diesel Generator, 비상 디젤 발전기) 조속기의 기구설계 논문이다. 원자력 발전소에서 EDG는 자연재해 등으로 인해 발전소의 전원이 끊어지는 긴급 상황에서 신속하게 보조 전원을 공급하기 위해 설치, 운영되는 장비이다. 발전소 전원이 상실되면 원자로 냉각 계통의 기기의 전원도 상실되어 원자로의 용융으로 인한 사고가 발생할 가능성이 높다. EDG는 이런 긴박한 상황에서 가동하기에 초기 기동속도 제어가 매우 중요하다. 이런 이유로 인해 EDG 기동의 신속성과 회전속도 상승에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Kim⁽¹⁾은 6MW급 EDG의 기동 성능 개선에 관한 실험적 연구를 진행했고 Kang⁽²⁾은 7MW급 EDG의 신속 기동시 회전수 상승구간에 관한 연구를 진행했다.

EDG에서 조속기는 속도 조절 기능을 담당한다. Fig. 1은 원심력을 이용한 기계식 조속기를 나타내었다. 밸브 액추에이터가 중간 링크들(슬리브, 커넥팅 로드)과 플라이볼의 위

치를 제어하고 arm 링크의 회전시 발생하는 원심력을 통해 EDG의 속도 제어가 가능해진다. 조속기는 회전 관성에 의한 원심력과 중력이 균형을 이루는 기구로 이 역시 많은 연구가 진행되어 왔다. Kang⁽³⁾은 상용소프트웨어를 이용하여 조속기의 동적 평형위치 해석 연구를 진행했다.

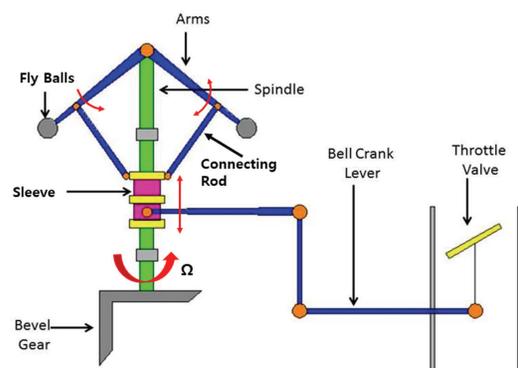


Fig. 1 Centrifugal governor of EDG⁽⁴⁾

* 한국수력원자력 중앙연구원(Korea Hydro & Nuclear Power, Central Research Institute)

† 교신저자, E-mail : sh23.shin@khnp.co.kr

2023 한국유체기계학회 동계학술대회 발표 논문, 2023년 11월 29일~12월 1일, 제주 ICC

The KSFJ Journal of Fluid Machinery: Vol. 27, No. 1, February 2024, pp.44~48(Received 22 Sep. 2023; revised 25 Oct. 2023; 05 Dec. 2023; accepted for publication 25 Dec. 2023)

EDG는 긴급 상황에서 사용하기에 매월 시험을 실시하여 해당 장비의 건전성을 주기적으로 확인하여야 한다. 이로 인해 짧은 시간 동안 장비를 기동하고 정지하는 경우가 많이 발생한다. 기동, 정지시에는 평상시보다 높은 토크가 발생하고 그 토크가 동력 기어에 전달되기 때문에 기어치의 피로, 마모 문제를 유발시킬 수 있다.⁽⁵⁾

따라서 본 논문에서는 원자력 발전소에서 사용하는 EDG의 요구사항과 문제점들을 만족시키는 새로운 조속기의 설계 방법을 제안하고자 한다.

2. EDG 조속기의 속도 제어

EDG 조속기의 동작 원리를 살펴보면, Fig. 2에서 슬리브가 수직 왕복운동(sliding motion)으로 움직이며 arm 링크와 플라이볼의 수직, 수평 위치를 제어한다. 이때 arm 링크는 가상의 동심 원 중심을 기준으로 움직인다. 슬리브가 위로 올라가면 arm 링크는 수평 위치 'A'에 가까워지며 플라이

볼과 회전중심까지의 거리(R)가 증가하게 된다. 이때 원심력 증가와 조속기의 속도(Ω)도 증가하게 된다. 반대로 슬리브가 아래 방향으로 내려가면 arm 링크는 수직 위치 'B'에 가까워지며 플라이볼과 회전중심까지의 거리(R)가 감소하게 된다. 이것은 원심력 감소와 조속기의 속도 감소를 유발한다.(Fig. 3 참조)

따라서, 플라이볼과 회전중심까지의 거리(R) 변화에 의해 EDG의 속도가 제어된다. 이때 슬리브의 움직임과 EDG의 회전속도 관계는 동심 원(R이 일정)의 특성상 동일한 가속도를 갖는 선형 관계이다. 이것을 그래프로 표시한 것이 Fig. 4이다.

가상의 편심원 형상은 2가지 방식으로 구현할 수 있다. 첫 번째는 편심 원의 장축 직경을 수직방향으로 위치시켜 설계하는 방법과 두 번째는 장축 직경을 수평방향으로 위치시켜 설계하는 방법이다.

Fig. 5는 첫 번째 설계 방법인 편심 원의 장축 직경을 수직방향으로 설계한 EDG 조속기이다. Fig. 5에서 나타낸 것

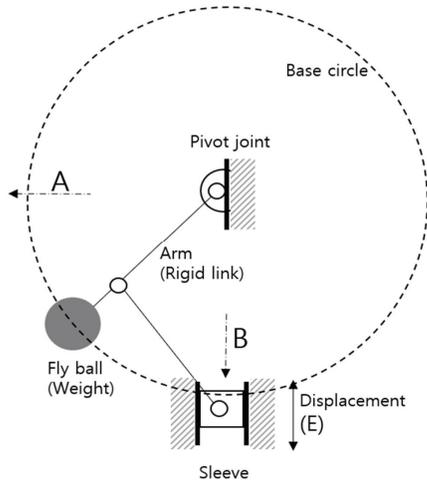


Fig. 2 Kinematic structure of EDG governor

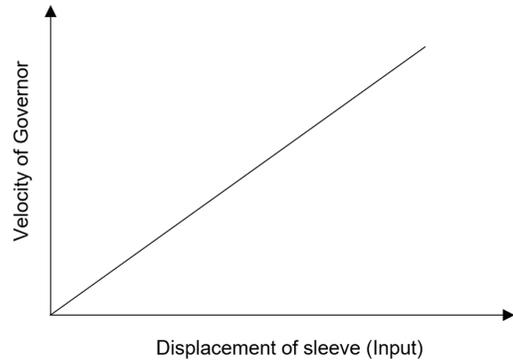


Fig. 4 Relationship between velocity of EDG and displacement of sleeve

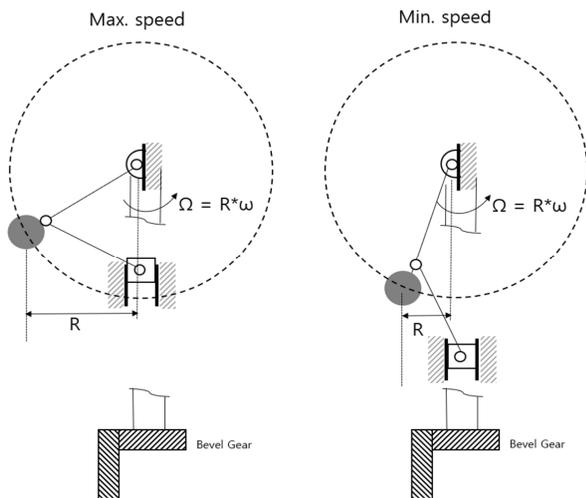


Fig. 3 Max. speed and Min. speed of EDG governor

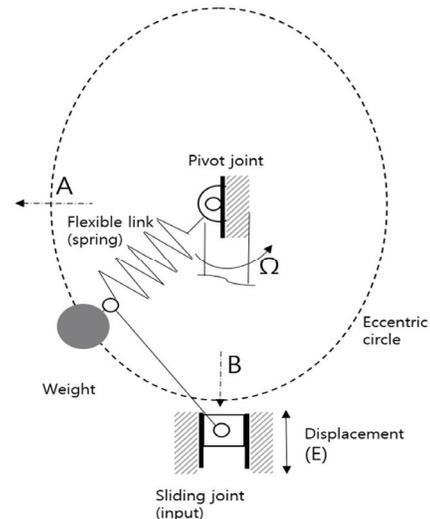


Fig. 5 Kinematic structure of new EDG governor(1)

처럼 플라이볼이 가상의 수직 방향 편심원 형상을 따라 저속 구간에서는 속도 변화가 빠르고 고속구간에서는 속도 변화가 완만해지는 구조이다. 해당 방식으로 EDG 조속기를 설계할 경우, 자연재해 등으로 인해 원자력 발전소내 전원이 끊어지는 긴급 상황에서 좀 더 빠른 속도로 EDG를 기동하여 보조 전원을 공급해 줄 수 있는 장점이 있다. 플라이볼과 원의 중심까지의 길이가 일정하지 않기 때문에 arm 링크는 스

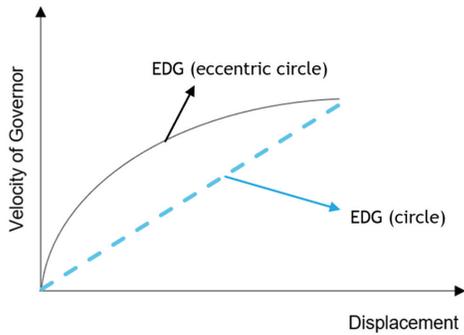


Fig. 6 Relationship between velocity of new EDG (1) and displacement of sleeve

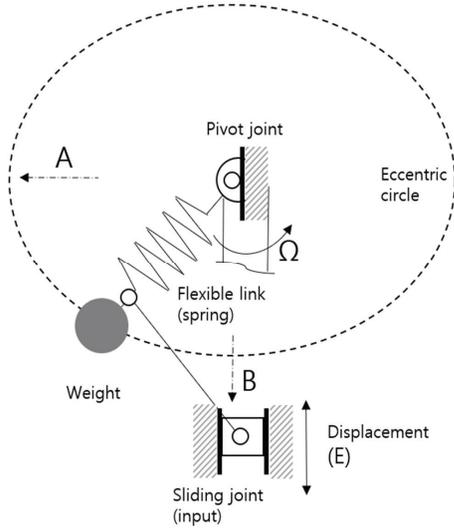


Fig. 7 Kinematic structure of new EDG governor(2)

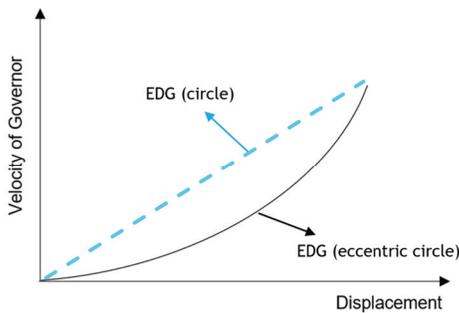


Fig. 8 Relationship between velocity of new EDG (2) and displacement of sleeve

프링으로 구현할 수 있다.

Fig. 7은 두 번째 설계 방법인 가상의 편심원 장축 직경을 수평 방향으로 설계한 EDG 조속기이다. 저속 구간에서는 속도 변화가 작고 고속구간에서 속도 변화가 큰 것이 특징으로 슬리브 변위와 조속기의 회전속도 관계는 Fig. 8과 같다.

위의 방법으로 설계한다면 저속 구간에서 속도 변화가 완만하여 매우 낮은 기동 토크가 발생할 것이다. 따라서 동력을 전달하는 베벨 기어치의 피로와 마모 문제를 예방할 수 있고 기동시 발생하는 축 진동 문제 역시 방지할 수 있다.

3. 편심 원의 기구학적 설계

편심 원을 설계하기 위해서 본 논문에서는 캠 형상(Cam profile) 설계 방법을 적용하였다. 일반적인 캠 설계는 원의 중심에서 종동절(캠과 맞닿는 매개체)의 접촉점을 엔벨롭 이론(Envelop theory)으로 구한 후, 그 점점들의 궤적을 곡선군 방정식(Family of curves)을 통해 구한다. 이때 원의 회전중심 각도와 점점의 변위 관계는 고속에 적합한 사이클로이드 운동(Cycloidal motion)으로 설정한다.^(6,7) 본 논문에서는 캠과 플라이볼이 실제 맞닿지는 않기에 캠의 형상을 따라 플라이볼이 움직이는 것으로 가정하여 캠 형상을 설계하였다.

Fig. 9는 편심 원과 플라이볼 사이의 기구학적 관계를 나타내었다. 편심 원이 회전하는 동안 플라이볼이 만들어내는 곡선군 방정식을 구하기 위해 기초원 중심이 원점에 고정된 이동좌표계 x_1-y_1 를 설정하였다. 플라이볼과 슬리브의 연결 지점에 고정좌표계 $X-Y$ 를 설정하면 이동좌표계 x_1-y_1 에서 바라본 플라이볼의 곡선군 방정식은 다음과 같다.^(8,9)

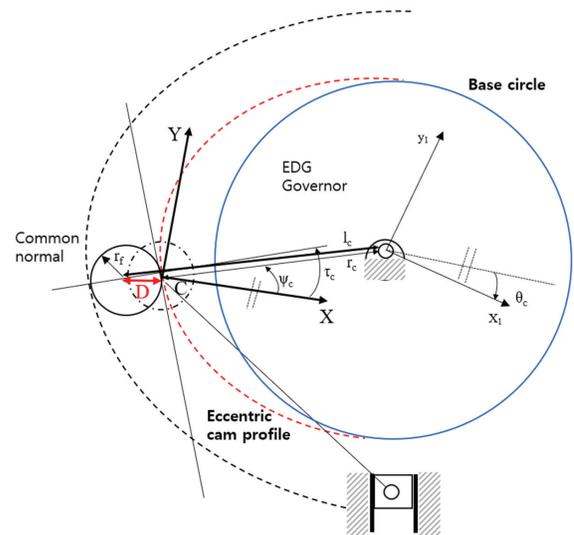


Fig. 9 Geometry relationship between governor links and fly ball

$$\begin{aligned} x_c &= r_c \cos(\theta_c + \psi_c) - l_c \cos(\theta_c - \phi_c) + r_f \cos(\theta_c + \tau_c) \\ y_c &= r_c \sin(\theta_c + \psi_c) - l_c \sin(\theta_c - \phi_c) + r_f \sin(\theta_c + \tau_c) \end{aligned} \quad (1)$$

Where,

- θ_c : Rotation angle of cam
- C : Contact point spindle to flexible link(arm)
- ψ_c : Rotation angle of connection point (spindle to flexible link)
- r_f : Radius of fly ball
- τ_c : Angle between X-axis and common normal between cam and connection point
- r_c : Distance from connection point to fly ball's center
- l_c : Distance from cam rotation center to the center of fly ball
- D : Fly ball's displacement

이동좌표계에서 편심 원 형태의 곡선군 방정식(1)을 엔벨롭 이론에 적용하기 위해 식 (2)에 대입하였다.

$$\frac{\partial x_c}{\partial \theta_c} \frac{\partial y_c}{\partial \tau_c} - \frac{\partial x_c}{\partial \tau_c} \frac{\partial y_c}{\partial \theta_c} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial x_c}{\partial \theta_c} = -r_f \sin(\theta_c + \tau_c) - r_c(1 + \psi'_c) \sin(\theta_c + \psi_c) + l_c \sin(\theta_c - \phi_c) \quad (3)$$

$$\frac{\partial y_c}{\partial \tau_c} = r_f \cos(\theta_c + \tau_c) \quad (4)$$

$$\frac{\partial x_c}{\partial \tau_c} = -r_f \sin(\theta_c + \tau_c) \quad (5)$$

$$\frac{\partial y_c}{\partial \theta_c} = r_f \cos(\theta_c + \tau_c) + r_c(1 + \psi'_c) \cos(\theta_c + \psi_c) - l_c \cos(\theta_c - \phi_c) \quad (6)$$

식 (2)를 τ_c 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\tan \tau_c = \frac{-l_c \sin \phi_c - r_c(1 + \psi'_c) \sin \psi_c}{l_c \cos \phi_c - r_c(1 + \psi'_c) \cos \psi_c} \quad (7)$$

τ_c 에 대하여 정리한 식 (7)을 다시 곡선군 방정식 (1)에 대입하면 좌표계 x_1-y_1 에서 바라본 접촉점의 궤적을 구할 수 있고, 이것이 캠 형상이 된다. 여기서, $\psi'_c = \frac{\partial \psi_c}{\partial \theta_c}$ 이다.

편심 원의 회전각과 플라이볼의 변위 관계를 사이클로이드 운동(Cycloidal motion)으로 식 (8)과 같이 지정하였으며, 여기서 D_R 은 편심 원을 따라 움직이는 오른쪽 플라이볼

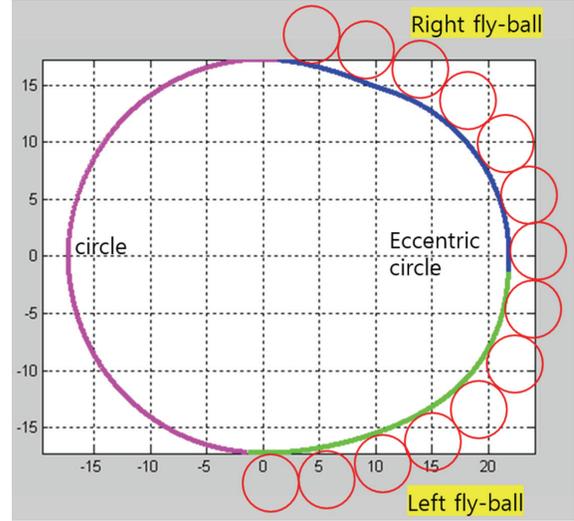
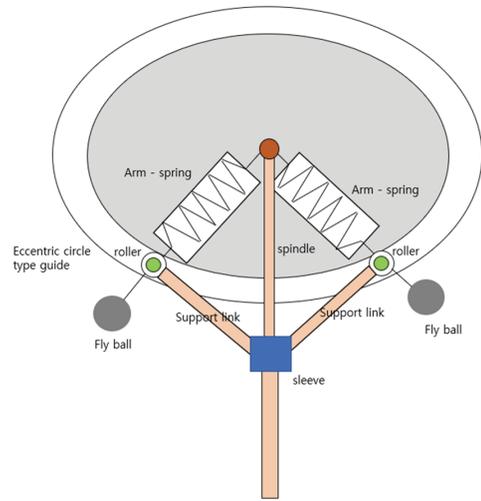
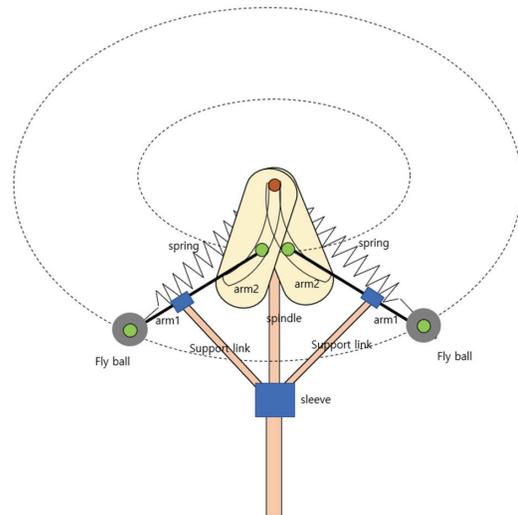


Fig. 10 Cam profile



(a) EDG governor using an eccentric cam guide



(b) EDG governor using two arm links

Fig. 11 New EDG governors using an eccentric circle

의 구간을 나타내고, D_L 은 편심 원을 따라 움직이는 왼쪽 플라이볼의 구간을 나타낸다.

$$D_R = L \left[\frac{\theta_c}{\alpha} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{\alpha} \theta_c\right) \right]$$

$$D_L = L \left[1 - \frac{\theta_c - \alpha}{\alpha} + \frac{1}{2\pi} \sin\left[\frac{2\pi}{\alpha} (\theta_c - \alpha)\right] \right] \quad (8)$$

where,

L = 조속기 플라이볼의 최대 거리

α = 플라이볼이 최대 거리일 때의 편심 원 회전 각도

식 (1), (7), (8)을 이용하여 설계한 캠 형상을 Fig. 10에 나타내었다. 본 논문에서 구한 캠 형상(곡면)을 조속기의 플라이볼이 움직이는 가이드로 이용하면 조속기의 회전속도를 설계자가 원하는 대로 제어할 수 있다.

Fig. 11의 (a),(b)는 앞에서 구한 캠 형상을 이용하여 새로운 EDG 조속기를 구현한 예시들이다. (a)의 기구는 arm 링크 중간 위치에 롤러를 설치하여 편심 원 형상의 가이드를 따라 움직이게 한다. 이때 플라이볼도 동일하게 움직이며 조속기의 속도를 제어한다. (b)의 기구는 arm 링크를 2개의 링크로 분리하였다. 2번 arm 링크의 내부에 편심 원 형상 구간 중 일부(곡면)를 이용하였다. 1번 arm 링크와 연결되는 부분이 해당 곡면을 따라 움직이며 조속기의 속도를 제어한다.

4. 결 론

본 논문은 원자력 발전소내 EDG의 요구사항과 문제점을 해결하기 위해 EDG의 기동 속도를 새로운 방식으로 제어하는 설계 논문이다. 기존 EDG에서는 조속기의 플라이볼이 가상의 동심 원 형상을 따라 움직였기 때문에 슬리브의 변위에 따른 EDG의 회전속도가 선형 관계이었던 반면에 본 논문에서 제안한 방식은 가상의 편심 원 형상을 따라 플라이볼이 움직이도록 설계하였기에 설계자의 요구사항에 맞춰 기동 속도 제어가 가능하다.

만약 EDG의 잦은 기동과 정지 반복 운전으로 인한 동력 전달 기어의 피로, 마모 문제가 발생했다면 기동 속도를 감소하는 설계로 해당 문제를 해결할 수 있고, 현재의 EDG 기동 속도보다 빠른 속도로 긴급 상황을 대비하고 싶다면 본

설계를 통해 대비가 가능해진다. 향후에는 이 새로운 조속기 기구의 설계 검증을 위해 상용소프트웨어를 통한 슬리브 변위와 조속기 회전 속도의 비선형 관계, 기어치의 마모 개선에 대한 부분을 검증할 예정이다.

References

- (1) Y.C. Kim, 2021, "An Experimental Study on the Improvement of the Starting Performance of an 6MW Emergency Diesel Generator", Journal of Korean Soc. Mechanical Technology, Vol. 23, No. 5, pp. 773-778.
- (2) S.H. Kang, Y.K. Kim, J.H. Son, 2021, "A Study on the RPM Rise Section of 7MW Medium Speed 4 stroke Emergency Diesel Generator for NPP During Fast Start Test", Journal of Korean Soc. Mechanical Technology, Vol. 23, No. 5, pp. 816-821.
- (3) J.S. Kang, 2013, "Analysis of Dynamic Equilibrium Configuration of Speed Governor", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 10, pp. 4733-4738.
- (4) <https://mechanicalbasics.com/watt-governor-pendulum-type-governor-height>
- (5) R. J. Drago, 2009, The Effect of Start-Up Load Conditions on Gearbox Performance and Life Failure Analysis, with Supporting Case Study, Gear Technology article, June 2009 (www.geartechnology.com)
- (6) Angeles J., Lopez-cajun, 1991, Optimization of Cam Mechanisms, Kluwer, Dordrecht.
- (7) Harold A. Rothbart, 2004, Cam Design Handbook, McGrawHill.
- (8) S.H. SHIN, S.H. Hwang, 2019, "Kinematic Design of the Pivot Surface in Tilting Pad Bearing," IGTC 2019 Tokyo.
- (9) S.H. SHIN, J.K. SHIM, J.W. Kwon, D.J. Im, 2007, "Dimensional Synthesis and Analysis of a VVL Mechanism with a Swing-arm Moves along a Circle", Proceeding of KSAE.
- (10) Der-Min Tsay, Meng-Hung Huang, Hui-Chun Ho, 2002, "Producing Follower Motions Through Their Digitized Cam", ASME Journal of computing and information science in engineering, Vol. 2, pp. 98-105.