

# 자동변속기용 유량제어 오일펌프의 회전속도 변화에 따른 성능 해석

문한별<sup>1</sup>, 조흥현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 기계공학과 대학원, <sup>2</sup>조선대학교 기계공학과

## Performance Simulation of Flow Control Oil Pump for Auto Transmission According to Rotating Speed

Han-Byul Moon<sup>1</sup>, Hong-Hyun Cho<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Chosun University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Chosun University

**요약** 본 연구는 자동변속기용 유량제어 오일펌프의 성능을 해석하는데 목적이 있다. 이를 위하여 유량제어 오일펌프의 해석적 모델을 개발하였으며 회전속도 변화에 따른 토출유량, 구동토크, 캐비테이션 발생량 등의 내부 유동특성을 분석하여 고찰하였다. 해석결과, 회전속도가 높아짐에 따라 캐비테이션 발생율이 증가하였으며 체적효율은 2200 RPM에서 90%이상으로 나타났지만 회전속도가 상승함에 따라 감소하여 5000 RPM에서 81%까지 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 흡입부 초기에 챔버 내 캐비테이션 비율이 20%~30%로 매우 높은 비율을 보였는데 압축에 의해 붕괴 이후의 캐비테이션 비율은 13% 이하로 낮게 형성되었다. 하지만 고속인 5000 RPM에서 17%로 빠른 속도로 발생량이 증가하는 현상도 확인되었다.

**Abstract** The purpose of this study is to analyze the performance of the flow control oil pump for automatic transmission. The numerical model for analysis the performance of the flow control oil pump was develop and the characteristics of the internal flow, discharge flow rate, displacement of outer ring, driving torque, generation of cavitation was investigated according to rotating speed. As a result, the cavitation generation increased as the rotating speed increased. The volumetric efficiency was 90% for 2200 rpm and it decreased rapidly, then it decreased about 81% for 5000 rpm. Besides, the cavitation generation was 20%~30% for inlet of suction part, but it reduced below 13% owing to the compression. However, it shows higher cavitation generation for high rotating speed like 5000 rpm.

**Key Words** : Auto transmission, Cavitation, Feedback pressure), Flow control vane pump

### 1. 서론

세계 기후 변화에 대응하기 위해 자동차 CO<sub>2</sub> 규제와 유해 가스 규제는 나날이 강화되고 국제 유가 급등으로 인한 고효율, 저연비 차량의 수요가 증가하고 있다. 현재 일반적인 내연기관 차량의 자동변속기에는 엔진의 회전력을 활용해 필요한 유압을 공급하는 오일펌프가 존재한다. 자동변속기용 오일펌프는 엔진의 회전력을 사용하기 때문에 오일펌프의 작동 토크가 증가하면 엔진의 성능을

저하시킬 뿐 아니라 빠른 회전속도에서 불필요한 유량과 압력을 발생시켜 동력 손실의 원인이 된다. 현재 자동변속기에 주로 사용되고 있는 기어펌프는 엔진 회전수가 일정 범위 이상 빨라지면 오일펌프의 토출유량이 과하게 증가하여 동력손실을 발생시키고 고속으로 회전하는 오일펌프에서 발생하는 캐비테이션에 의해 토출유량 감소, 소음, 진동 등을 발생시켜 고장의 원인이 된다. 이러한 현상을 해결하기 위해 높은 회전수에서 아우터 링의 운동에 의해 토출유량을 일정하게 조절할 수 있는 유량제

\*Corresponding Author : Hong-Hyun Cho (Chosun Univ.)

Tel: +82-62-230-7769 email: hhcho@Chosun.ac.kr

Received February 14, 2015

Revised April 3, 2015

Accepted May 7, 2015

Published May 31, 2015

어 베인펌프를 적용하여 윤활유의 과잉유입에 따른 동력 손실과 흡입부에서 발생하는 캐비테이션을 최소화하기 위한 연구가 필요하다.

고압의 토출유량이 요구되는 유량제어 베인펌프를 설계하기 위해서는 회전속도 변화에 따른 아우터 링 가변량과 캐비테이션 발생량 등을 분석하는 것은 매우 중요하다. 하지만 다양한 조건에 따른 성능 특성변화를 실험을 통해 파악하는 것은 많은 시간과 비용이 소모된다. 따라서 전산유체역학을 통한 3차원 수치해석을 이용하여 작동조건에 따른 성능특성 변화를 분석하면 시간과 노력을 절약할 수 있다.

이와 관련된 기존의 연구로는 Lee 등[1]은 상용수치해석 프로그램을 이용하여 조향장치용 베인펌프의 유동특성에 대한 CFD 해석을 진행하여 설계인자 변화에 따른 성능변화를 분석하였으며, Mo 등[2]은 경험식을 바탕으로 설계한 임펠러를 대상으로 고정회전수에 대한 유동 수치해석을 수행하여 Steffanoff 경험식과의 비교, 유효흡입수두(NPSH)의 영향에 대하여 고찰하였으며, Jang[3]은 압력 비평형형 베인펌프의 토출 압력 맥동특성에 영향을 미치는 변수들로서 압력과 회전속도를 내세웠다. 캐비테이션 발생에 관한 연구로 Peng 등[4]은 RNDS 난류방정식을 통해 하이드로 펌프 유닛의 가이드 베인의 표면의 거칠기에 따른 캐비테이션 발생 특성을 분석하였으며 Kim 등[5]은 상용 수치해석 프로그램의 캐비테이션 발생량 신뢰성 검증을 위해 산업용 원심펌프의 유량 변화에 따른 성능곡선과 수치해석 결과를 비교 고찰하여 해석 결과의 신뢰성을 확인하였다.

하지만 기존의 연구를 살펴보면 대부분의 연구가 임펠러에 집중되어 있으며 가변형 유량제어 베인펌프의 가변량 변화에 따른 성능특성 분석이 매우 미미한 상황이다. 따라서 본 논문에서는 자동변속기용 유량제어 베인펌프의 회전속도 변화에 따른 토출유량, 구동토크, 캐비테이션 발생 등의 내부 유동특성을 분석하여 고압의 유량제어 오일펌프의 효율 향상과 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 모델링 및 해석조건

### 2.1 유량제어 오일펌프 모델링

본 연구에서는 실제 작동 환경인 피드백 압력 변화에

따른 아우터 링의 움직임을 분석하기 위해 상용 수치해석 프로그램인 Pumplinx를 이용하여 유량제어 모델을 설정하고 회전속도 상승에 따른 성능특성 변화와 내부유동 변화를 분석하였다. 유량제어 베인펌프는 피벗을 기준으로 아우터 링이 회전하게 되며 이에 따라 흡입부 챔버의 체적 증가량이 감소하고 토출부 챔버의 체적 감소량이 줄어들어 토출유량이 조정되게 되며 유량제어 베인펌프의 피벗 위치와 아우터 링의 회전에 따른 챔버 체적변화를 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 유량제어 오일펌프는 9개의 베인에 의해 분리된 챔버의 체적변화에 의해 작동된다. 또한 본 논문에서 수치해석에 사용된 유량제어 오일펌프의 자세한 사양을 Table 1에 나타내었다.

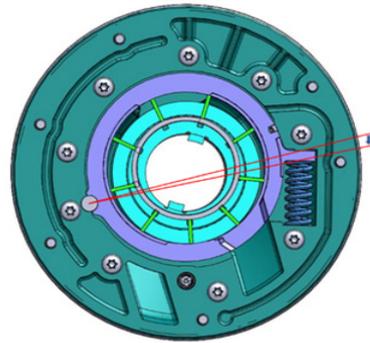


Fig. 1. Schematic of vane pump with displacement outer ring

Table 1. Specifications of vane pump

	Item	Specification
Rotor	Radius (mm)	87
Camring	Radius (mm)	80
Vane	Number (EA)	9
spring	Maximum displacement angle(°)	1.6

### 2.2 해석조건 및 방법

본 연구에서는 8속 자동변속기의 주행 시 요구 토출압력인 16 bar에 고정시키고 회전속도 변화에 따른 내부유동 특성을 분석하였으며 정상 작동 온도인 85°C에서 2200 RPM에서 5000 RPM까지 400 RPM씩 회전속도를 상승시켜가며 유량제어 오일펌프의 아우터 링 가변량, 캐비테이션 발생량, 토출유량 등의 성능특성 변화를 고찰하였다[10]. 위와 같은 변수들은 펌프의 압력 맥동

분석 및 캐비테이션 발생량 파악 등을 통하여 성능을 나타내는 대표적 지표중 하나인 체적효율을 파악하는 것에 그 기준을 세웠다. 본 논문에서 자동변속기용 유량제어 오일펌프의 성능 해석을 위해 설정된 해석조건을 Table 2에 나타내었다[10]. 가변형 베인펌프의 흡입부에서 회전속도가 빨라짐에 따라 흡입부 내부에 국부적인 저압 영역이 생성되면 이에 따라 크고 급격한 밀도 변화가 발생하는데 이를 캐비테이션이라 한다. 흡입부에서 발생한 캐비테이션은 고압인 토출부에서 급격하게 붕괴되어 소음이나 진동의 원인이 되며 심해지면 토출유량 감소와 부하 불균형의 원인이 되며 캐비테이션 급속한 붕괴에 유체기체를 침식시키는 원인이 되기도 한다. 따라서 캐비테이션 발생에 대한 정확한 해석은 매우 중요하다.

Table 2. Simulation conditions

Specification	Specification
Inlet pressure (bar)	1
Outlet pressure (bar)	16
Temperature (°C)	85
Rotation speed(RPM)	2200 - 5000

본 연구에서는 캐비테이션 현상에 대한 해석을 위하여 Full cavitation model[6]을 사용하였다. 기포의 생성과 수송의 경우 기포동역학에서 언급되는 Rayleigh plesset[7] 식을 이용하여 모델링 되었다.

$$R_e = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_{sat} - p}{\rho_l}} (1 - f_v - f_g) \quad (1)$$

$$R_c = C_c \frac{V_{ch}}{\sigma} \rho_l \rho_l \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_{sat}}{\rho_l}} f_v \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho f_v) + \nabla \cdot (\rho V f_v) \\ & = \nabla \cdot (I \nabla f_v) + R_e - R_c \end{aligned} \quad (3)$$

이 때 상변화율 계수  $C_e$ 와  $C_c$ 는 각각 0.02와 0.01이다[7].

중기수송 방정식은 상변화 기준인 포화증기압에 따라 증기의 생성과 소멸을 유발하게 되며 난류에 의한 속도의 변동은 국부적 난류 강도의 근사값으로 처리하였으며 압력 변동의 경우 상변화에 영향을 끼치는 압력을 증가시키는 방법으로 다음과 같이 모델링하였다.

$$V_{ch} = \sqrt{k} \quad (4)$$

$$p_{sat} = p_s(T) + 0.5p_{turb} = p_s(T) + 0.5(0.39\rho k) \quad (5)$$

비응축 가스의 질량분율을 통해 비응축 가스의 크기를 고려하였다. 비 응축 가스의 질량분율과 밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$f_g = \rho_g \frac{\alpha_g}{\rho} \quad (6)$$

$$\rho_g = \frac{WP}{RT} \quad (7)$$

따라서 비응축 가스의 질량분율은 일정한 값을 가지며 체적분율은 다음과 같이 계산되었다.

$$\alpha_g = f_g \frac{\rho}{\rho_g} \quad (8)$$

비응축 가스는 낮은 압력 영역에서 팽창하여 밀도가 낮아지기 때문에 질량분율이 일정하지만 체적분율은 커지게 된다. 이 팽창 정도가 임계값 이상 증가하게 되면 상변화가 발생하게 된다. 이러한 현상에 의하여 캐비테이션이 발생하게 된다.

이론 토출유량은 로터 1회전 당 챔버의 유체영역 변위에 회전수를 곱해 식(9)와 같이 계산하였으며 이를 통한 체적효율은 식(10)과 같다[8,9].

$$Q_{th} = (m_{max} - m_{min})v \quad (9)$$

$$\eta = \frac{Q_{th}}{Q} \quad (10)$$

가변형 베인펌프의 피드백 압력 변화에 따른 캠링의 변위를 분석하기 위해 캠링의 역학관계에 의한 유체/고체 상호작용을 계산하였다[10,11].

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} = T_{pressure} - T_{friction} + T_{spring} + T_{additional} \quad (11)$$

$$T_{pressure} = \int_{\sigma} p \vec{n} \times (\vec{r} - \vec{r}_o) d\sigma \quad (12)$$

$$T_{friction} = \int_{\sigma} f \vec{\tau} \times (\vec{r} - \vec{r}_o) d\sigma \quad (13)$$

$$T_{spring} = (-k\vec{x} - F_{preload}) \times (\vec{r}_s - \vec{r}_o) \quad (14)$$

여기서  $F_{preload}$ 는 스프링의 장착에 따라 생긴 스프링의 길이 변화에 따른 스프링의 반력이다.

본 연구에서 이용한 가변 용량형 베인펌프의 캠링의 변위는 최대  $1.8^\circ$ 로 작기 때문에 변위  $\vec{x}$ 는  $(\vec{r}_s - \vec{r}_o)\theta$  로 근사화 되어 식(14)는 다음과 같이 계산된다.

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} = T_{pressure} - T_{friction} + T_{preload} + T_{additional} \quad (15)$$

$$T_{preload} = -F_{preload} \times (\vec{r} - \vec{r}_o) \quad (16)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 해석결과 검증 및 토출유량 변화분석

본 논문에서는 로터가  $1^\circ$ 회전할 때마다 데이터를 수집하여 한 바퀴에 총 360번 데이터를 수집하였다. 또한 10바퀴 이상 수치해석을 진행하여 해석의 정확도를 향상시켰다. 본 논문의 수치해석 결과의 검증을 위하여 실험과 시뮬레이션 결과의 평균적인 토출유량을 비교 분석하였다. 실험은 다이나모 시험 장비를 활용하여 시행되었으며 V8 5.0 타우 엔진용 자동 변속기가 이용되었다 [10]. 시험 장비는 크게 구동모터, 오일펌프, 오일팬, 오일펌프 조절장치, 밸브로 구성된다. 구동모터는 자동변속기를 회전시켜 오일펌프를 작동하게 한다. 또한 실험은 수치해석과 동일한 조건에서 진행 되었다. Fig. 2는 실험결과와 수치해석 결과의 토출유량을 비교하여 보여주고 있다[10]. 피드백 압력에 의한 아우터 링의 가변에 의해 토출유량은 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 실험의 경우 피드백 압력의 조정을 통해 일정한 토출유량을 나타냈지만 수치해석의 경우 누설 및 기계적 손실을 수치해석에 반영하지 못해 최대 3%정도의 오차를 보였지만 수치해석 결과는 실험값과 유사한 값을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 토출유량이 베인펌프의 작동조건에 따라 일정하게 잘 제어되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 회전속도 변화에 따른 자동변속기용 유량제어 베인펌프의 체적효율 변화와 챔버 내부에서 발생하는 캐비테이션의 평균량을 보여주고 있다. 챔버 내에서 발생하는 캐비테이션이 상승함에 따라 체적효율은 감소한다. 발생한 캐비테이션은 토출유량 감소의 결과를 가져오고, 이에 따라 체적효율이 감소하는 것으로 나타났으며, 감소량은 회전속도 상승에 따라 아우터 링의 가변량

이 증가함에도 불구하고 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 빠르게 회전하는 베인에 의해 저압영역이 다량 발생하기 때문이다. 또한 2200 RPM에서 90%이던 체적효율은 5000 RPM에서 81%까지 감소하는 것으로 파악되었다. 이는 흡입부에서 다량 발생하는 캐비테이션과 베인의 이간현상에 의한 토출유량의 감소와 회전속도 상승에 따라 측면으로 치우쳐져 위치한 피벗을 중심으로 회전하는 아우터 링에 의한 흡입부와 토출부 챔버의 체적의 감소로 인한 압력강하 때문이다[11].

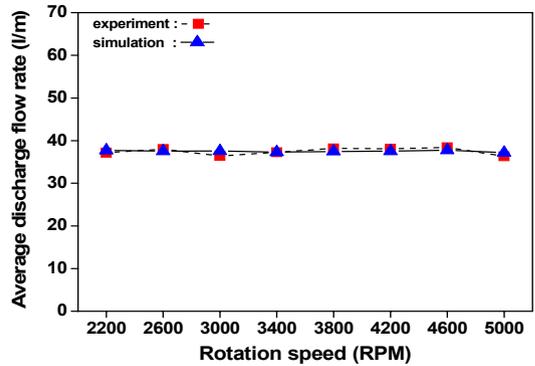


Fig. 2. Comparison of average discharge flow rate with rotating speed

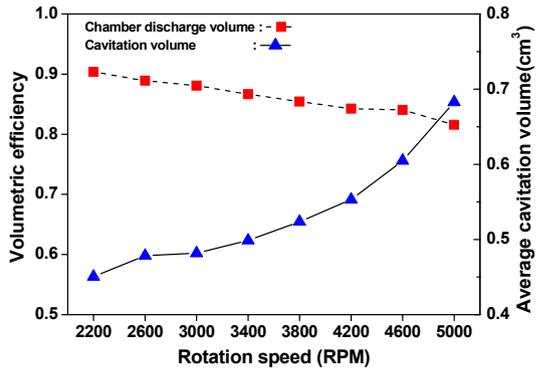


Fig. 3. Variation of volumetric efficiency and average cavitation volume with rotating speed

Fig. 4는 챔버가 1회전 하는 동안 하나의 챔버 내에서 발생하는 캐비테이션 체적과 챔버의 총 체적 비율을 보여주고 있다. 캐비테이션은 흡입부에서 급격한 증가와 감소를 보인 후 토출부에서 급격히 붕괴되는 것으로 나타났다. 흡입부 초기 챔버 내 캐비테이션 비율은 20%~30%로 비교적 높게 나타났다. 이는 흡입부 초기 챔버의 체적이  $0.06 \sim 0.57 \text{ cm}^3$ 으로 매우 작아 캐비테이션이 챔

버 내에서 차지하는 체적이 상대적으로 크게 나타나 캐비테이션 비율이 매우 높은 것으로 해석되었다. 하지만 실제 캐비테이션 발생량은 크지 않은 것으로 파악되었다. 흡입부 초기를 제외하면 5000 RPM 이하의 회전속도에서는 회전속도가 증가해도 챔버내의 캐비테이션 비율은 13%이하로 낮은 비율을 보였다. 하지만 5000 RPM에서 캐비테이션 발생량은 17%로 크게 증가하며, 이는 높은 회전속도와 베인의 이간으로 인하여 토출부와 흡입부의 연결 및 토출유량의 감소에 따른 영향이 크게 작용하기 때문이다[12].

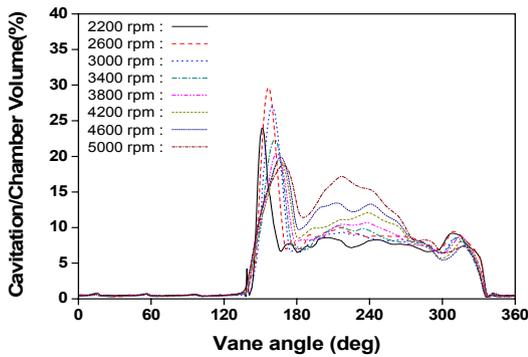


Fig. 4. Variation of cavitation generation rate in a chamber with vane angle

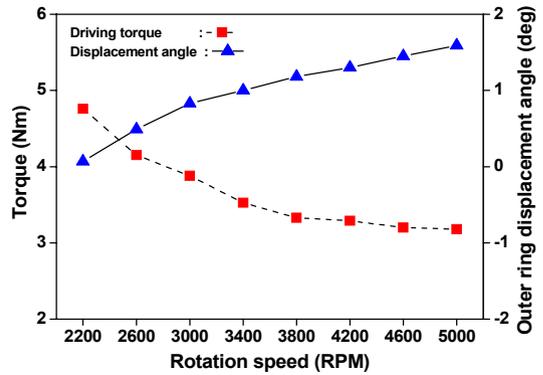


Fig. 5. Variation of driving torque and displacement angle with rotating speed

Fig. 5는 유량제어 베인펌프의 회전속도 변화에 따른 구동 토크와 아우터 링의 가변량을 보여주고 있다. 아우터 링의 가변량은 2200 RPM에서 0.07°에서 5000 RPM으로 증가함에 따라 1.6°까지 증가하였으며 회전속도가 상승함에 따라 증가폭이 감소하는 것으로 나타났다. 아우터 링의 가변량은 스프링의 변위  $\vec{r}_s - \vec{r}_o$ 에 근사화되므로, 식 (15)에 의하여 가변량이 증가할수록 스프링의 중심거리 차가 줄어들어 구동토크가 감소하며, 회전속도 증가에 대한 구동토크 증가에 비하여 보다 큰 영향

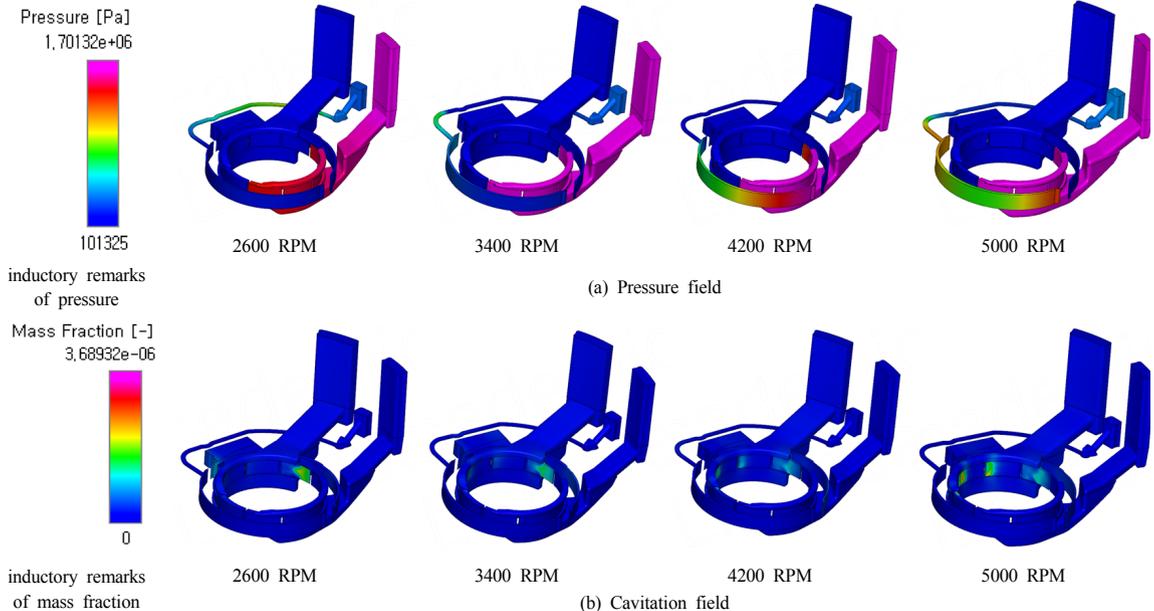


Fig. 6. Variations of pressure and cavitation generation with rotating speed

을 미치게 된다. 본 연구에서는 2200 RPM에서 구동토크는 4.8 Nm로 나타났으며 아우터링의 가변 발생에 따라 3.2 Nm까지 감소하였다.

Fig. 6은 자동변속기용 유량제어 오일펌프의 회전할 때 펌프에서 발생하는 압력과 캐비테이션 발생 변화를 2600, 3400, 4200, 5000 RPM에 대해서 보여주고 있다. 회전속도가 상승함에 따라 발생하는 과잉압축으로 인한 토출압력 상승은 유량제어 오일펌프의 특성인 피드백 압력을 통하여 제어되고 있으며[13], 특히 4200 RPM 이상의 회전속도에서 더욱 두드러지게 나타나는 것을 보여주고 있다. 토출부에서 급격하게 붕괴되는 캐비테이션에 의해 토출부 초기에 급격한 압력강하가 발생하였으나 곧 토출압력으로 회복되는 것으로 나타났다. 흡입부 초기에 다량 발생한 캐비테이션은 저속의 경우 챔버의 압축에 의하여 빠른 속도로 붕괴되어 발생량이 감소했지만 3000 RPM 이상의 고속의 경우 흡입부 전체에 다량의 캐비테이션이 발생하는 것으로 파악되었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고압의 토출유량을 요구하는 자동변속기에 적용되는 유량제어 오일펌프의 회전속도 변화에 따른 내부유동을 상용프로그램을 사용하여 분석하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 베인펌프의 회전속도가 증가하여 과압축으로 인한 압력 상승이 있더라도 아우터 링의 가변과 피드백 압력의 설정으로 토출유량을 일정하게 유지할 수 있으며, 체적효율은 2200 RPM에서 90%이상으로 나타났지만 회전속도가 상승함에 따라 5000 RPM에서 81%까지 감소하는 것으로 나타났다. 이는 캐비테이션 발생량 증가와 아우터 링의 가변에 따른 챔버 체적 감소와 캐비테이션 발생에 의한 토출유량 감소에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 흡입부 초기에 챔버 내 캐비테이션 비율이 20%~30%로 매우 높은 비율을 보였는데 이는 챔버의 체적이 작아 상대적으로 캐비테이션 체적이 높은 것으로 발생하는 캐비테이션의 절대량은 크지 않은 것으로 파악되었으며 흡입부 초기의 급격한 발생과 붕괴 이후의 캐비테이션 비율은 13% 이하로 낮게 나타났다. 하지만 5000 RPM에서 17%로 빠른

속도로 발생량이 증가하는 것으로 나타났다.

- 3) 아우터 링의 가변량은 작은 회전속도에서 큰 폭으로 증가하였으며 회전속도가 빨라짐에 따라 증가폭이 감소하는 것으로 나타났고, 구동토크는 아우터링의 가변량에 반비례하여 감소하는 것으로 나타났다. 또한 높은 회전속도에서 과잉압축으로 인한 과다 토출유량은 피드백 압력과 가변량 증가로 제어됨을 확인하였으며, 흡입부 초기의 캐비테이션은 저속에서는 흡입부 초기에만 존재하지만 3000 RPM 이상의 고속운전조건에서는 흡입부 전체에 다량의 캐비테이션이 존재하였다. 하지만 토출부에서 압력이 상승으로 캐비테이션 역시 붕괴되어 토출되는 것으로 확인 되었다.

#### References

- [1] S. H. Lee, N. K. Hur, "Numerical Study on Effects of Design Factors on Flow Characteristics of a Vane Pump", *Journal of KSFM*, Vol. 10, No. 3, pp. 24-31, 2007.
- [2] J. O. Mo, Y. T. Kim, Y. H. Lee, "Numerical Study on Cavitation Performance Evaluation in a Centrifugal Pump Impeller", *Journal of KOSME*, Vol. 36, No. 2, pp. 286-293, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2012.36.2.286>
- [3] J. S. Jang, K. H. Kim, "A Study on the Discharge Pressure Ripple Characteristics of Variable Displacement Vane Pump", *Trans. of the KSME*, Vol. 23, No. 3, pp. 134-145, 2003.
- [4] Y. C. Peng, X. Y. Chen, Yan. CAO, G. X. Hou, "Numerical Study of Cavitation on the Surface of the Gide Vane in Three Gorges Hydropower Unit", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 22, No. 5, pp. 703-708, 2010.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60106-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60106-2)
- [5] M. J. Kim, H. B. Jin, C. H. Son, W. J. Chung, "Numerical Analysis on Cavitation of Centrifugal Pump", *Journal of KFMA*, Vol. 16, No. 2, pp. 27-34, 2003.
- [6] A. K. Singhal, M. M. Athavale, H. Li, Y. Jiang, "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", *Journal of ASME*, Vol. 124, No. 3, pp. 617-624, 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1486223>
- [7] H. Lin, B. D. Storey, A. J. Szeri, "Inertially Driven

Inhomogeneities in Violently Collapsing Bubbles: The Validity of the Rayleigh-Plesset Equation", *Journal of Fluid mechanics*. Vol. 4, No. 452, pp. 145-162, 2002.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/s0022112001006693>

- [8] K. W. Nam, J. S. Hyun, J. I. Park, "Numerical Simulation in the IC Engine Lubricating Gerotor Oil Pump", *Journal of JSME(B)*, Vol. 30, No. 10, pp. 1019-1025, 2006.
- [9] J. H. Ha *Latest Hydraulic Engineering. 1st edn.* pp. 127-136, Cheong Moon Gak Co. Paju. 2011.
- [10] C. S. Kim, C. Y. Bae, C. J. Kim, K. S. Kim, T. S. Son, "Experimental Research on the Power Saving Effect Evaluation of a Variable Displacement Vane Pump for an Automatic Transmission", *Journal of KSAE*. Vol. 22, No. 7, pp. 1-7, 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7467/ksae.2014.22.7.001>
- [11] I. S. Jo, B. I. Hyun, J. Y. Jung, "The Separation of the Vane and the Camring at High Speed of an Oil ydraulic Vane Pump for Automobile", *Journal of KSTLE*, Vol. 26, No. 2, pp. 136-141, 2010.
- [12] M. S. Dong, "Study on reducing the Friction Torque of Vane Pump for Hydraulic Power Steering", *Dissertation, Jeonbuk University*. Jeollabuk-do, Korea, 2004.
- [13] J. H. Park, B. S. Hwang, J. Y. Jung, "Variable Displacement Vane Pump for Power Steering of Vehicle", *Journal of IKSFC*, Vol. 1, No. 3, pp. 16-19, 2004.

---

**조 흥 현(Hong-Hyun Cho)**

[중신회원]



- 2005년 8월 : 고려대학교 기계공학과 대학원 (공학박사)
- 2005년 9월 ~ 2006년 10월 : 삼성 전자 가전연구소 책임연구원
- 2007년 1월 ~ 2008년 3월 : 미국 NIST 객원연구원
- 2008년 4월 ~ 2014년 2월 : 조선대학교 기계공학과 조교수
- 2014년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

신재생에너지, 냉동공학, 열전달

---

**문 한 별(Han-Byul Moon)**

[중신회원]



- 2012년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 기계공학과 학부 재학

<관심분야>

CFD, 신재생에너지