

## 대형 차량용 유압식 리타더의 유동 특성에 관한 수치해석적 연구

박인성<sup>a</sup>, 장현<sup>a</sup>, 서정세<sup>b\*</sup>

## Numerical Analysis Study on the Fluid Flow Characteristics of Hydraulic Retarder for Heavy Vehicles

In-Sung Park<sup>a</sup>, Hyun Jang<sup>a</sup>, Jeong-Se Suh<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Graduate School Gyeongsang National University,  
Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, 660-701, Korea<sup>b</sup> School of Mechanical Engineering & ERI Gyeongsang National University,  
Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongsangnam-do, 660-701, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 18 July 2014  
Revised 27 November 2014  
Accepted 30 December 2014

## Keywords:

Hydraulic retarder  
Vaper lock phenomenon  
Fade phenomenon  
Computational fluid dynamics (CFD)

## ABSTRACT

This study examined the fluid flow characteristics of a hydraulic retarder adapted as an auxiliary brake for heavy vehicles. The commercial computational fluid dynamics (CFD) software STAR-CCM+ was used to investigate the torque performance and flow characteristics of the hydraulic retarder. The numerical results showed that the pressure distribution was higher near the inner wall surface of the rotor and stator. The pressure of the working fluid increased in the radial direction of the rotor and stator. The variation in the fluid velocity intensity showed a similar trend to that of the fluid pressure, but the maximum velocity appeared near the outer wall surface of the rotor and stator interface. The numerical results showed that increasing the revolution speed of the retarder greatly increased the rate of torque generation.

## 1. 서론

과거와 비교하여 요즘 자동차가 상용화되고 가정마다 차량은 1대 씩 있을 정도로 자가 차량소유의 비율이 늘면서 도로에 차량들이 많이 늘어났다. 차량이 늘어남에 따라서 교통사고 또한 증가하게 되었고 이에 따라 자동차 산업의 정책 및 제도적 환경이 변화하고 있고 각 나라 별로 자동차 안전 규제 글로벌 시장에서도 교통사고 및 사상자 감소를 위한 범국가적인 고 안전 정책을 Table 1과 같이 마련 중에 있다. 우리나라의 경우 '08년 215,822건의 교통사고가 발생하여 사망 5,870명, 부상 338,962명의 교통문화 최하위

국가'(08년기준, OECD 30개국 중 28위)로 선정된바 있으며 교통사고로 인한 사회비용 9.2조원, 교통혼잡 간접비용 24.6원의 규모로 큰 손실을 초래했다. 특히 트럭이나 버스 등 무게가 많이 실리는

Table 1 Trends in the global automotive safety policy

Nation	Goal year	Goal	Policy
Japan	2012	casualties 40% decrease	Smartway
Europe	2010	casualties 50% decrease	eSafety
U.S.A	2008	casualties 41% decrease	VSC
Korea	2012	casualties 50% decrease	17th president policy promises

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-751-5312  
Fax: +82-55-757-5622

E-mail address: jssuh@gnu.ac.kr (Jeong-Se Suh).

자동차가 긴 언덕길이나 고속주행 중에 풋 브레이크를 과다하게 사용하면 Fig. 1과 같이 제동부의 마찰열로 브레이크액이 끓어올라 브레이크 파이프에 기포가 발생되어 제동압력이 전달되지 않는 베이퍼록 현상과, 브레이크라이닝과 드럼 또는 디스크의 온도가 상승하게 되어 마찰계수가 극히 작아져 브레이크가 작동되지 않아 자동차가 미끄러지게 되는 페이드 현상이 발생하게 되어 결국 대형 사고로 이어지고 만다. 이에 대하여 대형차량의 보조 제동장치(리타더) 장착 의무화 법규 제정 검토를 진행 중에 있다.

대형 차량의 보조 제동장치로 쓰이는 리타더는 변속기 또는 차동 장치에 장착되어 회전체에 저항을 줌으로써 차량의 속도를 감속시키는 장치이며 대표적으로 유체를 이용하는 유압식, 전기를 이용하는 전기식이 있다.

유압식 리타더는 Fig. 2와 같이 제동 시 엔진브레이크를 단독으로 사용할 때와 엔진브레이크와 리타더를 동시에 사용할 때의 제동력 크기를 나타낸 그래프이다. 리타더에 필요 제동력의 80%를 발휘하여 우수한 제동능력을 가지며 전기식 리타더를 사용할 수 없는 6톤 이상의 대형차량에 사용된다. 또한 제동 시 발생하는 휠 브레이크의 열을 줄여 마찰력 손실이 적게 되고 이에 따른 사용빈도가 저감되어 휠 브레이크 사용 수명을 크게 연장시킨다. 또한 대형 상용차와 특수차량의 내리막길 또는 눈길에서의 일정속도를 유지할 수 있어 제동 안전성이 향상되며 유압의 이용으로 제동

응답성이 빠른 장점을 가지며 불필요한 가감속이 저감되어 배출 가스 저감 및 연비 향상 효과를 기대 할 수 있다. 최근 연구<sup>[1-3]</sup>에서는 리타더의 이론 및 실험으로 성능을 알아보았으며 수치해석으로는 리타더내 유동 경향성만 연구된 상황이다. 및 본 연구에서는 대형 차량에 보조 제동장치로 쓰이는 유압식 리타더에 관해 내부 유동특성 및 제동 토크를 CFD(computational fluid dynamics: 전산유체역학)를 통해 알아보고 이에 따른 설계 자료를 확보하고자 한다.

## 2. 리타더 구조 및 지배방정식

### 2.1 리타더 작동 원리 및 구조

유압 리타더는 서로 마주보는 로터와 스테이터의 날개 사이를 점성유체가 상호 이동하면서 운동량을 전달하는 원리에 의해 작동한다<sup>[4]</sup>. 로터가 회전하면 날개 사이에 갇힌 유체는 원심력을 받기 때문에 바깥쪽에서는 압력이 높고 안쪽에서는 상대적으로 압력이 낮은 상태를 유지한다. 유압 리타더의 기본적으로 Fig. 3과 같은 형상으로 스테이터와 로터로 이루어져있다. 기본적으로 유압 리타더는 감속기와 드라이브 샤프트 사이에 위치하며 때때로 감속기내에 위치하기도 한다.

### 2.2 리타더 형상 및 CFD 모델링

리타더의 기본 형상은 아래 Fig. 4와 같이 CATIA V5를 통해 로터와 스테이터를 모델링 하였으며 로터의 블레이드 개수는 16개이고 외경은 116.75 mm 내경은 56.75 mm, 스테이터의 블레이드 개수는 18개이고 외경은 118 mm 내경은 58 mm 이다. 두 블레이드의 각도는 45°로 동일하다.

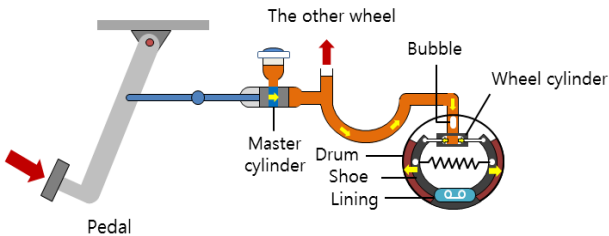


Fig. 1 Vapor lock phenomenon and fade phenomenon

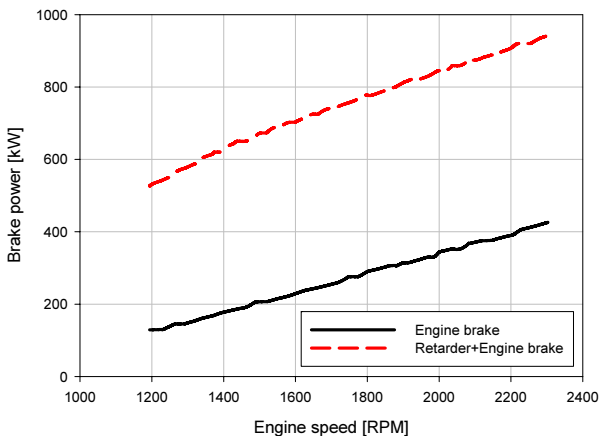


Fig. 2 Comparison of braking force on hydraulic retarder

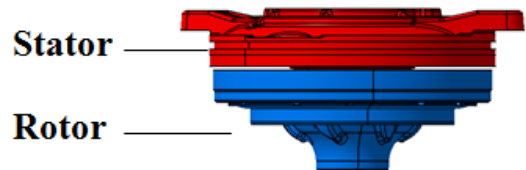


Fig. 3 Hydraulic retarder

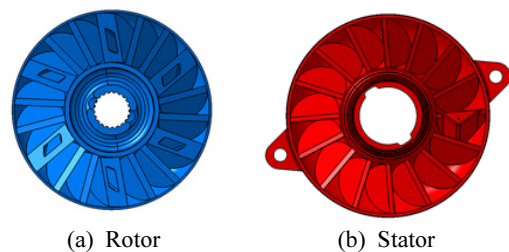


Fig. 4 3D model of retarder

Fig. 5는 리타더의 유동 부분만 취하여 IGS파일로변경 후 STAR CCM+에서 격자를 생성한 형상이며 메쉬 타입은 폴리헤드랄이며 격자수는 약 300만개이다.

### 2.3 지배방정식

먼저 유동 해석을 하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다<sup>[5]</sup>.

- (a) 리타더 내부에 유체는 가득 차 있다.
- (b) 로터와 스테이터의 모든 블레이드는 강체이다.
- (c) 작동 유체는 항상 동일한 온도를 가진다.
- (d) 정상상태이며 비압축성이다.
- (e) 중력에 의한 영향은 무시한다.

유동 해석을 하기 위한 지배 방정식은 크게 세 가지가 있는데 연속 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 보존 방정식이 이에 해당한다. 하지만 (c)의 가정을 따라서 에너지 방정식을 고려하지 않았다.

연속방정식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $t$ 는 시간,  $u$ 는  $x$ 축,  $v$ 는  $y$ 축,  $w$ 는  $z$ 축 방향의 유체의 속도이다. (d)의 가정에 따라서 비압축성 유체에서는  $\rho$ 가 상수이다. 또한 정상 상태인 경우, 연속 방정식은 다음 식 (2)와 같이 간단한 방정식이 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

운동량 보존 방정식은 아래와 식 (3)으로 표현된다.

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u \cdot \nabla u_i \right) = \rho g_i - \nabla P + \mu \nabla^2 u_i \quad (3)$$

여기서  $u$ 는 속도 벡터이고  $u_i$ 는 각 성분의 속도 벡터이며  $g_i$ 는 각 성분의 중력가속도,  $P$ 는 압력이고,  $\mu$ 는 유체의 동점도를 나타낸다.

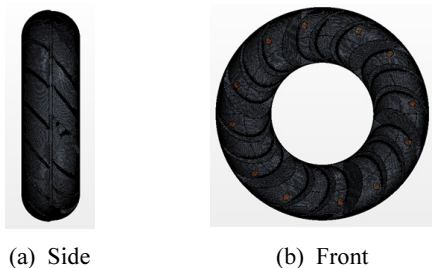


Fig 5. CFD modeling for analysis

(d)와 (e)의 가정으로  $\partial u_i / \partial t = 0, \rho g_i = 0$ 이 되어 최종적으로 운동량 보존 방정식은 식 (4)와 같이 간단히 표현된다.

$$\rho(u \cdot \nabla u_i) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u_i \quad (4)$$

### 2.4 난류모델

이번 연구에서 가장 적합한 난류 모델로 Standard  $\kappa$ - $\epsilon$  모델을 선정 하였다. 소용돌이 유동이 있을 때에는 비현실적인 점선속도 분포에 이르게 하는 과도한 난류 점성을 초래하기 때문에 부적당한 단점이 있지만 이 모델은 수렴성이 뛰어난 장점을 가지고 있으며 일반적으로 공학적으로 타당성을 인정받고 실제로 가장 많이 쓰이는 모델이다. Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  모델은 난류모델들 중에 뛰어난 모델이지만 공학적인 방법에 의해 입증되지 않았다. 게다가 Realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  모델은 로터와 스테이터를 다루는 문제에 있어서 비 물리적 난류 점도(non-physical turbulence viscosity)를 만들어 내게 된 결함을 가지고 있다. 이런 이유로 Standard  $\kappa$ - $\epsilon$  모델을 최적의 난류 모델로 선택하였다.

### 2.5 경계조건

유압 리타더의 입,출구는 Fig. 6과 같이 모두 로터 부분에 있으며 로터 내부에 보이는 6개의 사각형이 입구이며 외부에 보이는 12개의 노란 원이 출구이다. 유압 리타더의 경계조건에서 입구와 출구

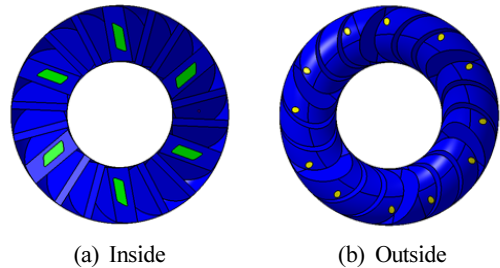


Fig. 6 Inlet and outlet of retarder

Table 2 SAE 80W Properties

Property	Unit	Inspection Data
SAE Viscosity	-	80W-90W
Absolute Density, 15°C	kg/m <sup>3</sup>	896
Kinematic Viscosity, 40°C	mm <sup>2</sup> /s	139.5
Kinematic Viscosity, 100°C	mm <sup>2</sup> /s	14.38
Viscosity Index	-	99
Brookfield Viscosity, -26°C	Pa·s	135
Brookfield Viscosity, 12°C	Pa·s	-
Flash Point	°C	178
Pour Point	°C	-27

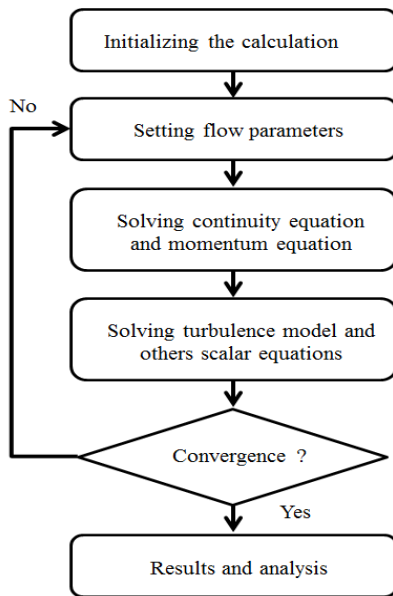


Fig. 7 Flow chart of CFD calculation

에 10 bar로 가정하였으며 이는 실제 베인 펌프에서 리타더로 이송되는 유압이 10 bar이며, 리타더 시스템 외부의 압력 또한 이와 비슷한 10 bar의 압력을 가지기 때문이다. 로터의 속도는 800, 1200, 1600, 2000 RPM으로 4가지로 분류 하였다. 작동유로는 SAE-80W를 사용 하였으며 이에 대한 물성치는 Table 2에 나타내었으며 작동유의 온도는 40°C로 가정하여 이때에 해당하는 점도를 사용하였다.

전체적인 유동 해석은 과정은 위에 보이는 Fig. 7과 알고리즘 순서대로 진행되었다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 유동 경향성

유동 해석 결과 800, 1200, 1600, 2000 RPM에서 유압 리타더내 유동의 방향성은 모두 거의 동일하였으며 이것을 Fig. 8처럼 유선의 흐름으로 나타내었다. 유동은 입구에서 들어와 반대편 스테이터를 향해 흐르며 스테이터 벽면과 부딪쳐 다시 로터로 돌아오게 되며 전체적으로 반시계 방향으로 회전하고 있는 유동 경향성을 보였다. 다음은 Fig. 9와 같이 임의의 단면을 잘라서 각 RPM별로 속도 및 압력분포를 알아보았다.

Fig. 10은 로터의 각 RPM별 압력분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 RPM이 증가 할수록 최소 압력은 더 감소하고 최대 압력은 더 증가하여  $\Delta P$ 는 증가함을 알 수 있었다. 또한 압력 분포를 보면 중심부에서 저압이며 로터와 스테이터 반경 끝 부분에서 높은 압력 분포를 보이고 있다. 전체 적으로 반경방향으로 갈수록 높은 압력 분포를 나타냈다. Fig. 11은 로터의 각 RPM별 속도

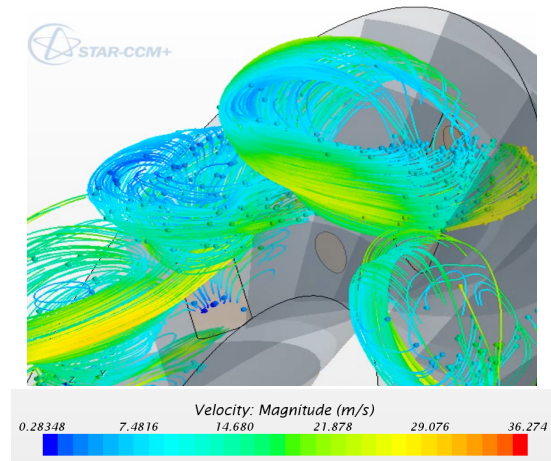


Fig. 8 Streamline in retarder

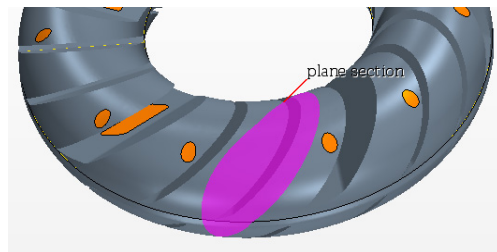


Fig. 9 Random section of retarder

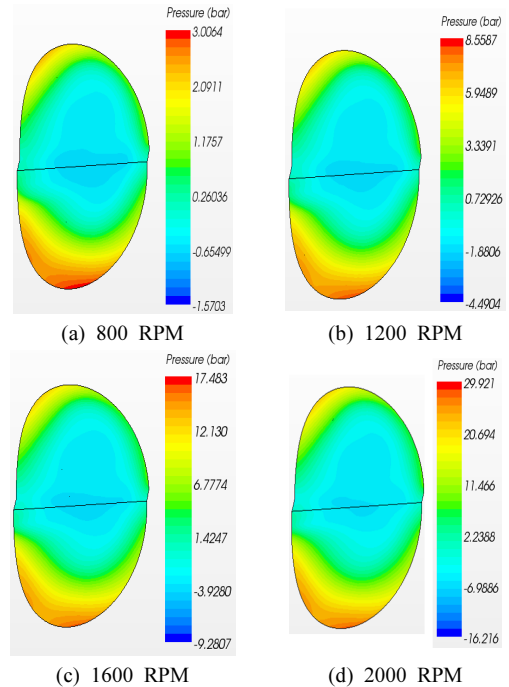


Fig. 10 Distribution of pressure according to RPM

분포를 나타낸 그림이다. 압력 분포와 마찬가지로 RPM이 증가할수록 이에 비례하여 평균 속도 및 최대 속도가 증가함을 알 수 있었다. 또한 중심 부분에서 압력이 낮은 분포를 보였던 것처럼 속도 또한 느린 것을 확인 할 수 있었다.

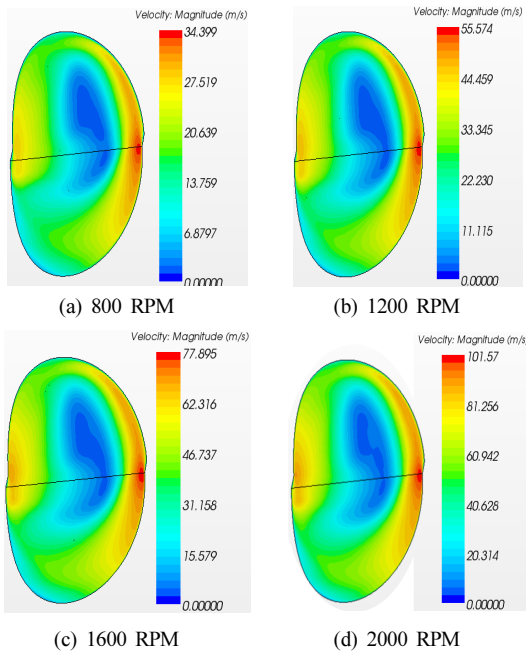


Fig. 11 Distribution of velocity according to RPM

Table 3 Generated torque according angular velocity

Angular velocity of rotor (RPM)	Generated torque (N·m)
800	308.93
1,200	842.38
1,600	1,688.55
2,000	2,889.56

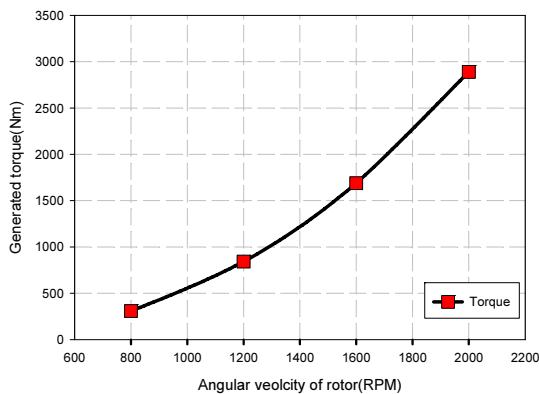


Fig. 12 Torque curve of retarder

### 3.2 발생 토크

CFD에서는 앞서 반복 계산으로 얻어진 압력과 중심축으로부터 떨어진 거리를 기반으로 로터의 제동 토크가 계산된다. Table 3 은 RPM별로 로터에서 발생된 토크를 정리하여 나타내었다. 또한 이것을 Fig. 12처럼 보기 쉽게 그래프로 나타내었다.

그래프에서 보이듯이 로터의 RPM이 증가하면 커질수록 발생 토크 또한 커짐을 알 수 있다. 이는 앞서 유동 경향성에서 보았듯이

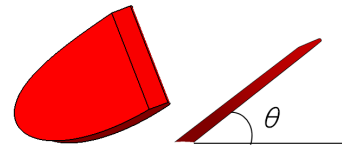


Fig. 13 Shape of stator blade

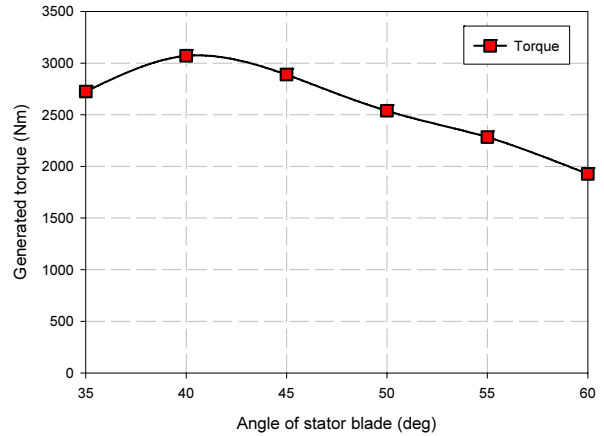


Fig. 14 Generated torque of blade angle

RPM이 증가하면 리타더내 속도와 압력이 증가하였기 때문이다. 또한 그래프의 기울기를 보면 RPM 구간 마다 기울기가 변화되는데 800~1,200 RPM 보다 1,200~1,600 RPM이 토크 발생율이 높고 1,200~1,600 RPM 보다 1,600~2,000 RPM에서 토크 발생율이 더 높음을 알 수 있다.

또한 리타더의 형상변화에 따른 토크 변화를 알아보기 위해 로터의 RPM을 2,000 RPM으로 고정하고 Fig. 13과 같이 스테이터 블레이드의 각도 변화에 따른 토크의 크기를 알아보았다.  $\theta$ 는 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°로 5케이스로 하고 어느 각도에서 최대 토크가 발생하는지 알아보았다. 해석 결과 Fig. 14에서 보는 바와 같이 35°~40° 구간에는 증가하는 경향성을 보이나 40°~60° 구간에는 점차 감소하는 성향을 보인다. 최대 토크는 40°에서 3071.7 Nm의 토크를 가졌으며 이는 기본 형상인 45°와 비교하여 182.14 Nm 증가한 수치이다. 반면에 최소 토크는 60°에서 1928.07 Nm의 토크를 가졌으며 이후로는 점점 더 감소 할 것으로 예상된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 리타더내 유동특성에 대하여 연구 하였으며 다음과 같은 결론을 지을 수 있다.

압력은 리타더내 중심으로부터 반경방향으로 갈수록 압력이 증가하는데 이는 중심 부분에 와류가 형성되어 부압이 생성되었기 때문인 것으로 보인다. 속도는 압력과 같이 중심부에서 저속이며 인터페이스 외경부분에서 고속으로 나타났다.

리타더의 토크는 RPM에 비례하여 증가하는 경향을 보였다. 또한 스테이터 블레이드의 각도별로 토크의 크기를 알아보았는데 블레이드 각도는 40°로 설계 되어야 가장 큰 토크를 발생시킴을 알 수 있었다. 추후 연구로 스테이터 블레이드 개수 및 로터 블레이드 각도 및 개수를 변수로 하여 수치해석을 진행할 계획이다.

## 후 기

본 연구의 일부는 광역경제권 거점기관 지원사업과 BK21 플러스 대학원 육성 사업의 일환으로 수행된 결과이며 관계자들에게 감사드립니다.

## References

- [1] Wang, F., Ma, Y., Yan, D., 2007, Numerical Simulation of 3-D Flow through the Control Valve of Hydraulic Retarder, *Machine Tool & Hydraulics*, 35:3 90-91.
- [2] Shen, W., 2009, Theoretical and Experimental Research on Hydrodynamic Retarder Braking Process, A Thesis for Master's Degree, Agricultural University, South China.
- [3] Huang, R., Wu, L., Shao, J., 2006, Principle and Application of Vehicle Hydraulic Retarder, *Auto Electric Parts*, 11 6-8.
- [4] He, R., Yan, J., Lu, M., 2009, Three-dimensional Numerical Simulation and Performance Prediction of Hydraulic Retarder, *Automobile engineering*, 31:3 250-252.
- [5] Liu, C., 2008, Review on Development of Auxiliary Braking Set of Automobiles, *China Safety Science Journal*, 18:1 105-111.
- [6] Jang, H., Kim, R. H., Park, I. S., Kim, H. C., Suh, J. S., 2014, A Study on Stator-Rotor of Retarder For Commercial Vehicle, *Proceedings of the KSME 2014 Spring Annual Meeting*, 384-385.
- [1] Wang, F., Ma, Y., Yan, D., 2007, Numerical Simulation of 3-D Flow