2004 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 705~710
인하대학교 정석학술정보관 및 2북호관 2004. 12. 3~4

토크 컨버터 내부의 비정상 후류 유동특성에 대한 수치해석 연구

원찬식* • 허남건**

A Numerical Study of Unsteady Wake Flow Characteristics in a Torque Converter

Chan-Shik Won*, Nahmkeon Hur**

Key Words : Torque converter(토크 컨버터), Moving mesh(이동격자), Speed ratio(속도비), Torque ratio (토크비), Capacity factor(용량계수)

ABSTRACT

In the present study, a transient incompressible viscous turbulent flow is simulated for the automotive torque converter with moving mesh technique. For the analysis, entire torque converter flow passages are modeled. Computed torque ratio, capacity factor and efficiency show a good agreement with the experiment data. The flow instabilities characterized by back-flow and wake etc. appeared in some cascade passages are shown to be propagating along tangential direction. These flow patterns are mainly influenced by the pump and turbine blade passing and can't be predicted through conventional steady simulation with a mixing plane approach. The understanding of the unsteady flow characteristics in a torque converter achieved in the present study may lead to the optimal design of a torque converter.

1. 서 론

자동차 산업의 발달과 함께 자동변속기의 수요가 증가하고 있으며, 아울러 이에 상응하는 기술 향상이 크게 요구되고 있다. 특히 자동변속기의 기계요소 중 토크 컨버터는 Fig. 1과 같이 엔진으로부터 얻은 동력을 변속기에 전달하는 유체기계로써 자동차의 성능 및 연료 경제성에 지대한 영향을 미치므로 최적화된 설계 기술 확보가 필요하다. 이러한 필요성에 부응하여 그동안 토크 컨버터에 관한 많은 연구들이 진행되어왔다. 초창기 토크 컨버터의 성능 해석은 각운동량 이론에 기초하는 1차원 단일유선해법[1]을 이용하여 이루어졌다. 각 요소의 입·출구에서 속도삼각형을 이용하고, 수력손실에 관한 모델을 가정하여 토크 컨버터 내부의 순환유량을 대표하는 자오 유속에 관한 오일러 방정식(Euler equation)을 유도하며, 이 방정식에 의해 토크 컨버터의 성능이 계산된다. 그러나 토크 컨버터의 강한 3차원적 유동 특성에 기인하여 다양한 가시화 및 측정 실험과 수치해석적인 방법으로 대체되어 오고 있다. By 와 Lakshminarayana[2-4]는 토크 컨버터의 각각의 요소인 펌프, 터빈, 스테이터의 실험 및 포텐셜 유동 코드를 이용한 해석을 통해 압력장을 측정, 예측하여 토크 컨버터의 전체 유로 내에서 일차원 해석법으로는 예측할 수 없는 코어와 쉘 사이에 큰 압력구배가 존재함과 모든 구성 요소의 날개면 정압분포는 대체적으로 코어 쪽에서 불안정함을 나타내었다. 또한 비점성 유동계산법은 각 요소 날개의 스팬 중앙에서

* 서강대학교 기계공학과 대학원
** 서강대학교 기계공학과
nhur@ccs.sogang.ac.kr

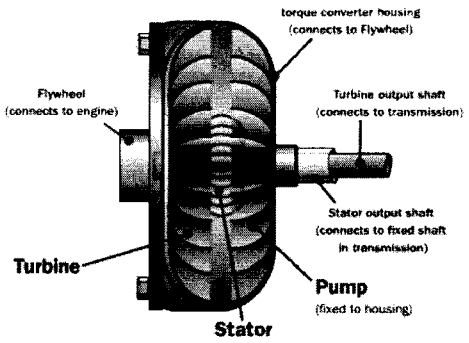
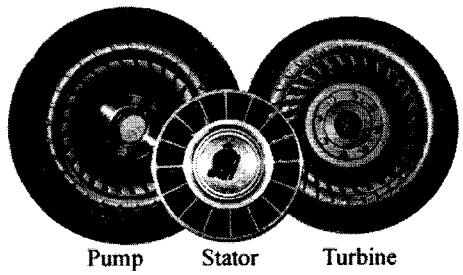


Fig. 1 The connection of the parts of the torque converter between the transmission and engine

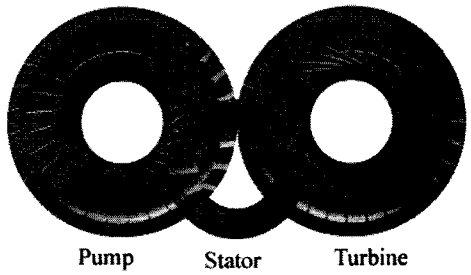
압력분포를 잘 예측할 수 있었으나, 코어와 쉘에서는 매우 부정확함을 보여주었다.

실험뿐만 아니라 수치해석적인 접근 방법에서도 다양한 연구들이 진행되고 있다. 1980년대 및 1990년대 초까지 연구된 수치해석적 방법은 비점성 유동을 해석하거나 혹은 2차원 해석, 그리고 출구 부분을 실제 형상과 다르게 계산영역에서는 가상으로 길게 생성하여 Neumann 조건을 적용하는 등 하여 수치해석의 가능성 및 성능 특성해석 결과를 제시하였으나 다소 부적절한 해석 모델을 사용함으로써 그 응용이 제한적이었다. Schulz[5] 등은 표준 κ-ε 모델을 사용하는 유한체적법(FVM, Finite Volume Method)을 이용하여 토크 컨버터의 유동 해석을 통하여 정상상태 해석과 비정상 간섭에 대한 수치해석 결과를 보여주었다. 이를 통해 스테이터와 펌프, 스테이터와 터빈 사이의 비정상 유동간섭은 무시할 수 있지만 펌프와 터빈 사이의 비정상 유동간섭은 정상상태의 속도분포 30%에 해당할 정도로 크다는 것을 나타내었다. 그러나 본 해석은 세 요소가 모두 결합된 토크 컨버터의 수치결과는 제시하지 못하였다. 2000년대에 들어서 전산 시스템과 수치기법의 발달로 인해 좀더 실제적인 수치해석 결과들을 볼 수 있다. 특히 Dong[6]등은 동시에 3개의 요소 해석뿐만 아니라 중심 누설 유동 및 캐비테이션의 해석을 병행하고 실험과 비교함으로써 누설 유동이 성능 및 효율에 미치는 영향을 확인하고 보다 상세하고 다양한 설계 정보를 제시하였다.

그러나 펌프, 터빈, 스테이터로 구성된 토크 컨버터의 형상은 큰 유동 교란을 갖는 복잡한 3차원 유동 특성 및 강한 2차 유동 현상, 큰 유동 박리 영역 및 비정상 유동 특성 등을 발생시킨다. 지금까지 혼합면



(a) Photograph of a model used in present study



(b) Computational Model

Fig. 2 Torque converter model

모델을 이용한 정상상태 해석을 통하여 많은 결과들을 보여주고 있지만 다양한 속도비의 운전조건을 갖는 토크 컨버터에 대한 비정상 상태 해석은 거의 이루어지지 않았다. 토크 컨버터에서 발생하는 비정상 유동 특성은 기계 자체의 성능 및 소음, 연료 효율 등에 지대한 영향을 미치지만 해석 컴퓨터의 성능 및 해석 방법 등의 제약 조건 때문에 큰 어려움을 가지고 있으나, 본 연구에서는 실제 토크 컨버터 해석 영역 전체를 모델링 하여 이동 격자법을 이용한 비정상 유동 해석을 통하여 보다 실제 현상에 가까운 유동의 비정상 특성 해석 결과를 도출하고자 한다.

2. 수치해석 대상

2.1 계산 격자 및 물성치

토크 컨버터의 비정상 해석을 위하여 Fig. 2와 같은 모델을 이용하여 해석 격자를 생성하였다. 해석 모델 토크 컨버터의 직경은 260mm이며 각각 요소의 날개의 개수는 펌프 29개, 터빈 31개, 스테이터 15개로 이루어져있다. 해석 격자의 수는 총 2,890,000 여개를 사용하였다. 작동 유체로는 ATF(Auto-Transmission Fluid)로서 밀도 875.1 Kg/m^3 점도 5.662E-3 Kg/ms 이다.

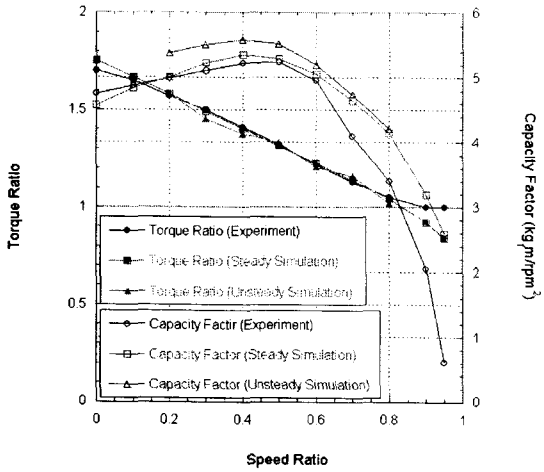


Fig. 3 Torque ratio & capacity factor according to various speed ratio

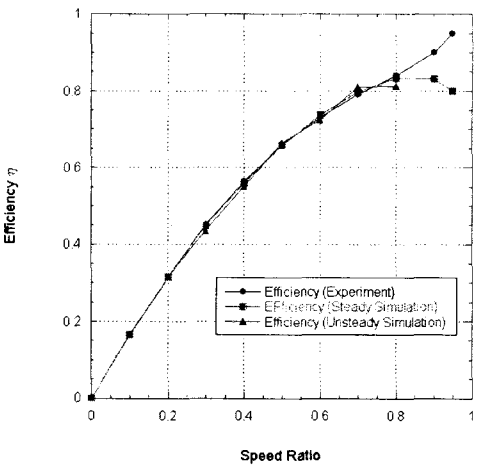


Fig. 4 Efficiency according to various speed ratio

2.2 해석 방법

본 연구의 해석을 위해서 상용 유동해석 프로그램인 STAR-CD v3.15를 이용하여 3차원 비압축성 난류 유동 수치해석을 수행하였다. 그리고 토크 컨버터의 움직임을 모사하기 위하여 실제 운전 조건에 따라 격자를 이동(회전)시켜 계산을 수행하였다. 각각의 속도비에 따라서 매 Time Step 마다 펌프와 터빈이 회전한다. 이 때 Time Step은 펌프의 회전이 1 Time Step 마다 1° 회전하는 것으로 설정하였으며 터빈은 이데 대한 속도비에 따른 상대적인 움직임을 갖는다. 해석 격자를 이동 시키면 펌프-터빈, 터빈-스테이터, 그리고 스테이터-펌프 사이에 불연속적인 해석 격자면이 형성되는데 이부분에는 Attach 경계조건을 적용하여 매 해석 시간 간격마다 이동에 따른 정보의 교환이 적절히 이루어지도록 하였다. 아울러 해석 case는 아래 식(1)로 정의되는 SR(Speed Ratio)=0.2~0.8까지 다양한 속도비에 따른 해석을 하였다.

Speed Ratio

$$SR = \frac{N_T}{N_P} \tag{1}$$

여기서 N_P는 펌프의 회전속도, N_T는 터빈의 회전속도를 나타낸다. 해석은 본 연구실에서 보유하고 있는 Linux Cluster를 사용하였으며 Intel Zeon 2.4GHz CPU 12개를 사용하여 유동 특성이 시간에 따라 주기적인 경향성을 보일 때 까지 약 72시간이 소요되었다.

3. 해석 결과

3.1 토크비, 용량 계수 & 효율

토크 컨버터 비정상 결과 중 토크비와 용량 계수를 실험 결과와 비교하여 Fig. 3에 효율을 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 토크비, 용량 계수, 효율은 다음과 같이 식 (2), (3), (4) 로 정의 된다.

Torque Ratio

$$\tau = \frac{T_T}{T_P} \tag{2}$$

Capacity Factor

$$CF = \frac{T_P}{N_P^2}\frac{(kg_f \cdot m)}{(rpm^2)} \times 10^6 \tag{3}$$

Efficiency

$$\eta = \frac{N_T T_T}{N_P T_P} = SR \times TR \tag{4}$$

여기서 T_P는 펌프의 토크, T_T는 터빈의 토크를 나타낸다. 결과를 살펴보면 토크비와 효율은 실험 결과를 매우 잘 예측하고 있음을 알 수 있으며, 용량계수를 살펴보면 전체적으로 정성적인 경향성은 잘 예측하고 있으나 정량적인 값에서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 수치해석시 토크를 과다 예측하기 때문이며, 토크 컨버터의 내부 유동은 매우 복잡한 3차

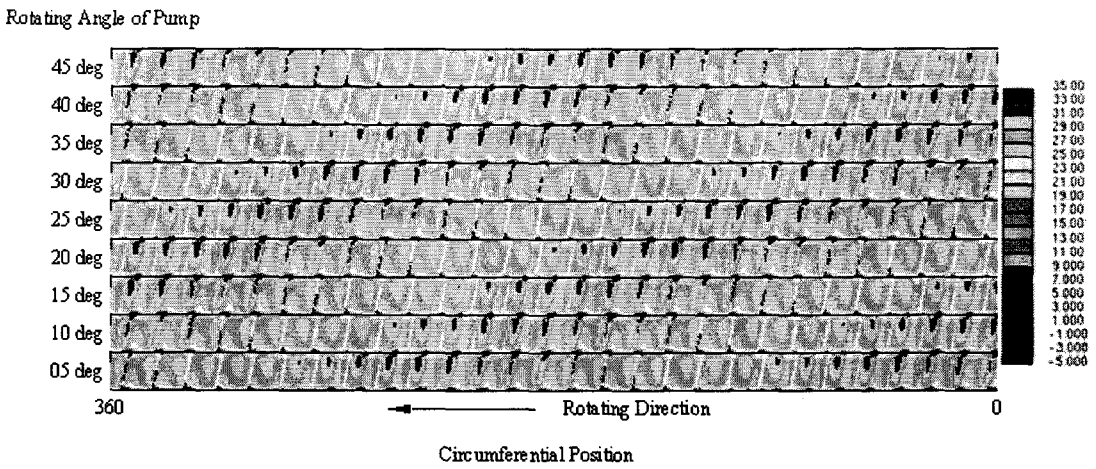


Fig. 5 Transient velocity distribution and wake propagation at the pump outlet & turbine inlet (SR=0.6)

원 특성을 지니며 또한 강한 난류 경향성을 가지므로 이는 다양한 난류 모델 및 해석 알고리즘의 검토가 필요할 것으로 생각된다.

3.2 속도 분포

토크 컨버터의 비정상 속도 특성을 알아보기 위하여 비정상 특성이 가장 크게 영향을 미치는[5] 펌프 출구와 터빈 입구에서, 속도비 SR=0.6 일 때 시간에 따른 속도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 가로축은 원주방향의 위치를 나타내며 해석 좌표계를 중심으로 0° 에서 360° 를 나타낸다. 그리고 세로축은 초기 위치를 0° 로 기준을 잡았을 때 시간에 따른 펌프의 회전 각도를 나타내며 1° 회전 시 8.9944E-5 초 가 걸린다. 그리고 각각의 회전의 그림에서 아랫면은 코어(Core)를 그리고 윗면은 쉘(Shell)을 나타낸다.

유동 특성을 살펴보면 펌프 출구의 코어와 흡입면에서는 펌프와 터빈 날개의 교차에 따라 그 크기나 존재하는 범위의 차이는 보이지만 항상 역류가 존재한다. 역류가 일어나는 범위는 원주방향에 대하여 약 20%~70%를 차지한다. 그리고 이러한 역류는 유로 중심에서 쉘로 이동하면서 그 영향은 크게 감소하나 완전히 사라지지는 않고 각각의 날개의 상대적 위치에 따라

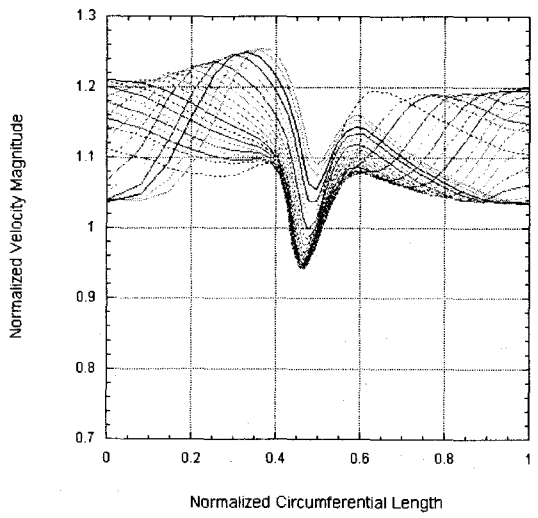


Fig. 6 Transient velocity magnitude at the pump outlet

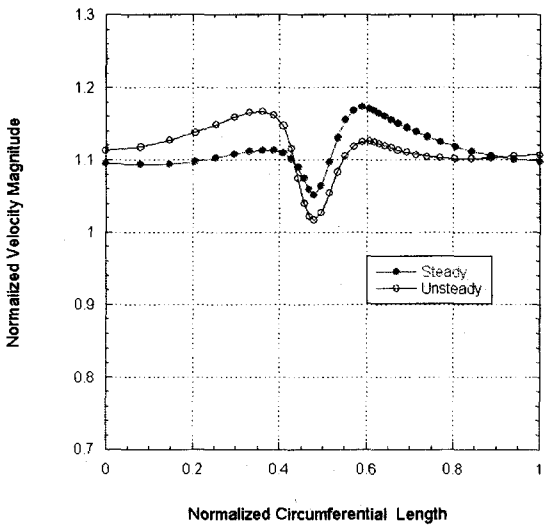


Fig. 7 Comparison of velocity magnitude between steady and unsteady results at the pump outlet

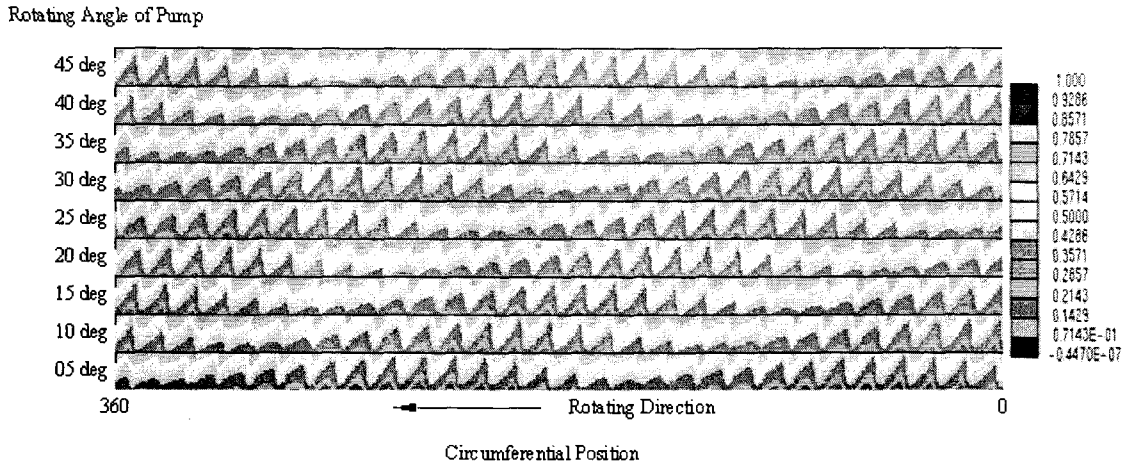


Fig. 8 Transient pressure coefficient distribution at the pump outlet & turbine inlet (SR=0.6)

생성과 소멸을 반복한다. 펌프의 날개 후연(trailing edge)에서 발생하는 후류(wake) 또한 펌프와 터빈 각각의 날개의 교차에 따라 그 크기의 차이를 가지고 전파되는 경향성을 보인다. 따라서 역류, 후류 등 시스템 성능과 효율에 큰 영향을 미치는 인자는 날개의 교차에 따른 유동의 전파 양상임을 알 수 있으며 이러한 현상은 정상상태 해석만으로는 예측 할 수 없다. 보다 자세한 유동 특성을 살펴보기 위하여 펌프 출구 중간 스팬에서의 시간에 따른 속도 분포를 Fig. 6에 나타내었으며 이에 따른 시간 평균된 속도분포와 정상상태 해석을 통하여 구하여진 속도 분포를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 가로축은 전체 펌프 계산 영역 중 1개의 유로에 대한 원주 방향으로 무차원화된 길이를 나타내고 세로축은 펌프 날개 팁 속도로 무차원화된 속도를 나타낸다. Fig. 6에서와 같이

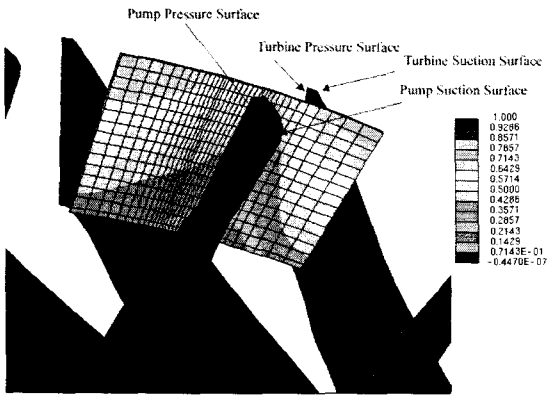


Fig. 9 Pressure distribution according to pump & turbine blade position

시간에 따른 속도 분포는 주기적인 특성을 가지고 변화하며 그 주기는 터빈 날개의 개수에 따라 결정된다. 시간 평균된 속도 분포와 정상 상태의 속도 분포를 비교하여 보면 비슷한 경향성을 보이고 있으나 정상 상태의 경우 비정상 상태 해석 결과에서 나온 주기적인 속도 양상중 하나만을 나타내고 있으며 특히 날개 뒷 영역에서 형성되는 후류의 크기는 다소 작게 예측하고 있다.

3.3 압력 분포

속도비 SR=0.6에서 시간에 따른 압력 계수 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 압력 계수는 펌프 Tip에서의 속도를 이용하여 계산하였다. 결과를 살펴보면 토크 컨버터 전체적으로 쉘 부분에 큰 압력이 작용하고 상대적으로 코어 부분에는 낮은 압력이 분포한다. 즉 쉘과 코어사이에 큰 압력 구배를 가지고 있음[2-4]을 확인해 볼 수 있다. 그리고 전체적인 압력 계수는 회전에 따라 Fig. 9와 같이 각각 날개의 압력면과 흡입면 사이의 상호작용으로 주기적으로 변화한다. 또한 펌프 날개에 대하여 상대적으로 터빈 날개가 교차하는 영역에서 압력의 크기는 감소하였다가 회복하는 경향을 보이게 된다. 이러한 경향성은 Fig.8에 보이는 펌프 출구와 터빈 입구 mid-span & pitch에서의 시간에 따른 압력 계수의 변화를 살펴보면 보다 명확히 알 수 있다. 날개가 교차하는 영역에서는 압력계수 값이 급격히 감소하였다가 날개 교차가 없는 영역에서는 상대적으로 서서히 회복됨을 확인할 수 있다. 특히 이러한 영향은 터빈의 압력면과 펌프의 흡입면이 교차하는 경우

크게 작용하는데 비정상 해석을 수행하는 경우 두 날개의 교차시 발생하는 후류 영역에서의 역류 현상을 예측할 수 있다.

4. 결 론

토크 컨버터의 비정상 유동 특성을 연구하기 위하여 이동 격자 방법을 이용한 비정상, 비압축성 난류 유동을 해석하였다. 해석 결과를 통하여 토크비, 용량계수 및 효율이 실험과 잘 일치함을 확인하였다. 그러나 전체적으로 토크를 다소 크게 예측하는 결과를 보였으며, 이는 난류 모델 및 해석 기법의 검토를 통하여 향후 향상될 것으로 생각된다. 유동적인 측면에서는 본 연구를 통하여 역류 및 후류 등의 유동 불안정성 등이 회전에 따라 시스템 전체적으로 전파되는 특성을 잘 예측하였으며 이러한 현상은 펌프와 터빈 날개의 상호 교차 특성에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 터빈의 압력면과 펌프의 흡입면이 교차하는 경우 그 영향을 더욱 크게 받는다. 비정상 해석을 통하여 펌프 출구면에서 순간적인 역류 현상이 예측되었는데 보다 일반적인 결과를 도출하고 설계시 적용될 수 있는 유용한 정보를 제공하기 위하여 날개각의 변화 및 형상의 변화를 통한 비정상 유동 현상 예측이 이루어 져야 할 것이다.

후기

본 연구는 한국파워트레인(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Whitfield A., Wallace F. and Silvalingham R., 1978, "A Performance Production Procedure for Three Element Torque Converters," Int. J. Mech. Sci., Vol. 20, pp. 801-814.

(2) By R. R. and Lakshminarayana B., 1995, "Measurement and Analysis of Static Pressure Field in a Torque Converter Pump," Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, pp. 109-115.

(3) By R. R. and Lakshminarayana B., 1995, "Measurement and Analysis of Static Pressure Field in a Torque Converter Turbine," Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, pp. 473-478.

(4) By R. R. and Lakshminarayana B., 1991, "Static Pressure Measurement in a Torque Converter Stator," SAE Paper, #911934.

(5) Schulz H., Greim G. and Volgmann W., 1996, "Calculation of Three-Dimensional Viscous Flow in Hydrodynamic Torque Converters," Journal of Turbomachinery, Vol. 118, pp. 578-589.

(6) Dong Y., Korivi V., Attibele P. and Yuan Y., 2002, "Torque Converter CFD Engineering Part II: Performance Improvement through Core Leakage Flow and Cavitation Control," SAE Paper 2002-01-0884.