한국동력기계공학회지 제13권 제6호 pp.82~87 2009년 12월

토크 컨버터 내부 유동장 측정 (II)
Flow Field Measurements in a Torque Converter (II)

유성출 · 장성국
S. C. Yoo and S. K. Jang

(접수일 : 2009년 8월 20일, 수정일 : 2009년 10월 7일, 채택확정 : 2009년 11월 9일)

Key Words : Torque Converter(토크 컨버터), LDV(레이저 유속계), Window(관측창), Impeller(임펠러), Turbine(터빈), Speed Ratio(속도비)

Abstract : LDV measurements were conducted on the planes between impeller blades of torque converter. The flow fields are extremely complex because they contain unsteady viscous three-dimensional flows. Besides of their complexity, the difference in rotor speeds between the impeller and turbine compound the flow effects. The good spatial resolution of the LDV allows measurements of the instantaneous flow structures within the impeller passage, yielding valuable information about the production automotive torque converter in realistic operating conditions. It was found that the mass flow rates are strongly related with the internal flow characteristics of torque converter.

1. 서 론

변속기오일에 의한 동력전달 기능을 수행하는 토크 컨버터는 내부를 순환하는 유동을 제어하기 위하여 구동축의 임펠러, 피동축의 터빈 및 정익의 3가지 요소로 구성되어 있다. 엔진 구동에 의한 임펠러의 회전이 변속기오일에 원심력을 제공하게 되고 이에 따라 유체는 임펠러 유로에 의해 안내되어 반경방향의 운동량을 갖고 임펠러를 떠나게 된다. 터빈은 운동량을 받아 변속기에 전달해 주고, 터빈을 떠난 변속기오일은 정익을 통과하면서 안내를 받아 다시 임펠러로 들어간다. 이들 각 요소의 유동장 특성은 각각의 유동특성에 따라 토크 컨버터의 성능이 크게 바뀌기 때문에 중요하게 인식되어 왔다. 또한, 토크 컨버터의 각 요소를 통과하는 변속기오일에 의한 동력전달 방식은 여러 가지 장점에도 불구하고 유체를 매개체로 함으로서 발생하는 동력손실이 단점으로 지적되고 있다. 토크 컨버터의 성능을 향상시키기 위해서는 토크 컨버터의 특성을 지배하는 순환류의 정확한 유동장 해석이 요구된다. 최근의 유동해석은 전산유체역학(CFD)의 발전에 힘입어 활발하게 진행되고 있으나 복잡한 내부구조 및 3차원적이며 강한 난류현상과 이차유동 등의 특성으로 양산되는 토크 컨버터에 대한 직접적인 유동장 측정 및 해석은 아직도 어려운 실정이다.

자동변속 차량의 동력성능 및 변속성능과 토크 컨버터 내부유동의 관계에 대한 연구는 오래전부터 꾸준히 지속되고 있다. Fister 등[1]은 대형 산업용 토크 컨버터의 유동장을 최초로 측정 하였으나 여러 가지 실험조건의 차이로 결과물을 자동차용 토크 컨버터와 비교하기에는 다소 제한이 따른다. By 등[2]은 토크 컨버터 내부의 복잡한 형상과 3가지 구성부품이 각각 다른 속도로 회전하기 때문에 유동장의 특성 이해는 매우 어려우며, 내부유동의 분석은 토크 컨버터 유동손실과 관련이 있는 물리적 유동현상(physical flow phenomena)을 측정함으로서 가능하다고 결론을 지었다. Bahr 등[3]은 플렉시글래스(plexiglas)로 제작한 모형 토크 컨버터와 레이저 유속계(LDV)를 이용하여 정익 부근의 유동장 해석을 시도하였다. 이 방법은 레이저 유속계를 이용한 관심영역의 측정에서 좋은 결과를 보여주었으나, 플렉시글래스 재질의 문제로 실제 작동상태를 구현하지 못하는 어려움이 있었다. 그들은 터빈과 임펠러 블레이드(blade)의 순간적 위치가 정익 부근의 속도장에 매우 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. By 등

유성출(책임저자) : 한라대학교 기계자동차공학부
E-mail : scyoo@halla.ac.kr Tel. 033-760-1215
장성국 : 한라대학교 기계자동차공학부

[4]은 8개의 정압프로브(probe)를 사용하여 토크 컨버터의 펌프 파라미터와 정압장(static pressure field)을 측정하였다. 모든 속도비에서 정압분포는 일반적으로 고르지 못하며 슈라우드(shroud)부분에서 박리의 발생을 보고하고 있다. Lee 등[5]은 레이저 유속계를 사용하여 양산되는 토크 컨버터의 임펠러 유로 중간영역인 슈라우드와 흡입면 모서리부분에서 유동장을 측정한 결과 속도비 0.8에서 유동 박리에 의한 재순환영역이 발생하는 것을 확인하였다. 국내에서는 주로 수치해석과 실험에 의한 성능측정 결과의 비교가 보고되고 있다. 김홍식 등[6]은 일차원해석법이 토크 컨버터의 성능을 정확하게 해석하지 못하는 이유는 일차원해석법에 의한 순환유량의 평가가 부정확하기 때문이라고 밝히고 있으며, 신세현 등[7]은 3차원수치계산을 통해 토크 컨버터 유동장에 대한 성능해석을 하였다. 그밖에 많은 연구가 토크 컨버터 성능향상 및 유동특성 이해를 위해 진행되고 있다. 그러나 토크 컨버터 연구의 최종 지향점은 토크 컨버터 각 부위의 유동특성에 대한 해석과 이로부터 파생된 최종효율 등에 대한 연관관계 규명 및 제어기술개발임을 생각할 때 이를 위하여 유동특성에 대한 보다 분석적인 접근이 요구되고 있다. 따라서 양산되는 승용차용 토크 컨버터를 사용하여 실제 운전 상태에서 행한 유동장 해석 결과는 여전히 중요하다고 하겠다.

본 연구에서는 그동안의 연구결과를 정리하여 이를 바탕으로 실험 장치를 개발하였고, 양산되는 승용차용 토크 컨버터에 관측창을 내부유동에 영향을 미치지 않도록 제작·설치하여 토크 컨버터 임펠러 유로내의 주 유동방향 유동장을 실제 운전 상태에서 레이저 유속계를 이용하여 측정하였다. 유체의 속도는 유동해석에서 가장 중요한 관심사 중의 하나이다. 속도를 측정하면 측정 데이터가 비록 일부분만 있어도 대략적인 유선의 형태나 박리영역의 존재 및 정체되는 유동영역 등 각종 유동특성을 알 수 있다. 유동장의 측정은 뚜렷한 토크 증배기능을 나타내는 임펠러 회전속도가 1600 rpm이고 터빈 회전속도는 633 rpm인 속도비 0.4 조건에서 임펠러 유로의 중간영역과 출구영역에서 각각 실시하였다. 본 연구는 토크 컨버터 주 유동의 정량적 해석을 통해 복잡한 내부유동에 대한 보다나은 이해를 가능하게 하며, 동시에 토크 컨버터 개발방법을 보다 논리적이고 체계적인 접근 방법으로 나아가게 하는 가교 역할에 도움을 줄 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치의 구성

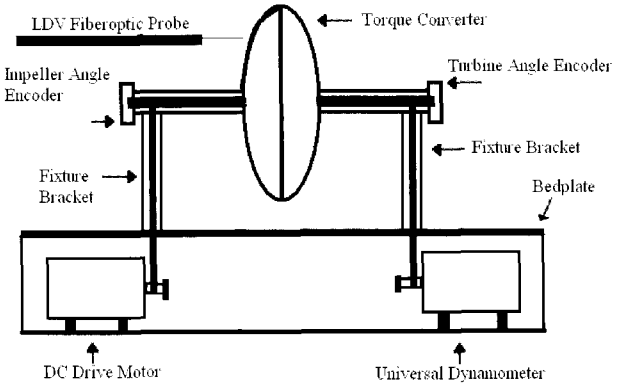


Fig. 1 Schematic of test rig assembly

실험 장치는 Fig. 1과 같이 토크 컨버터 설치대, 대판(bedplate), 40 kW 직류모터와 40 kW 유니버설 동력계(universal dynamometer)로 구성하였다. 토크 컨버터는 직류모터로 구동하였으며, 유니버설 동력계는 부하조건을 위하여 사용하였다. 구동모터는 2500 rpm 까지 속도변환이 가능하며 2 : 1 비로 연결된 벨트에 의하여 임펠러를 5000 rpm 까지 회전시킬 수 있다. 유니버설 동력계는 피동축에 연결된 터빈을 5000 rpm 까지 구동할 수 있다. 직류모터와 동력계의 속도는 분리된 제어장치를 사용하여 실험조건에 따라 각각 조절하였다. 임펠러와 터빈 그리고 정익 축에는 스트레인게이지(strain gauge)를 각각 설치하여 실시간으로 토크를 측정하였다. 변속기오일의 온도는 실제 승용차 운전조건과 동일하게 유지하기 위하여 수냉식으로 작동되는 온도제어장치를 제작하여 사용하였다. 또한 임펠러와 터빈축의 양 끝에는 앵글 인코더(angle encoder)를 설치하여 운전 중에 위치를 알 수 있었다.

2.2 레이저 유속계

레이저 유속계는 4W Ar-Ion 레이저와 TSI 제품의 렌즈, 프리즘, 신호 처리장치(digital burst correlator, IFA750), Bragg-cell frequency shifter, 이송장치 그리고 데이터 취득을 위한 컴퓨터 등으로 구성하였다. 측정은 관측장을 통하여 이루어지므로 Fig. 2와 같은 구조의 4-빔(beam) 광섬유프로브(fiberoptic probe)를 이용한 후방산란(back scattering) 방법을 채택하여 실시하였다. 사용된 산란입자는 플라스틱 재질로서 표면이 금속코팅(metallic coated)된 지름

9 μm 크기의 입자이다[8].

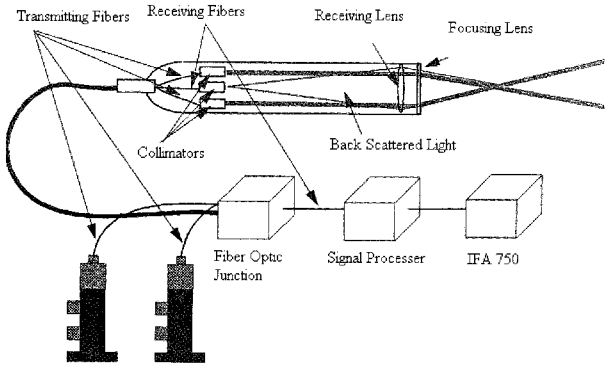


Fig. 2 Back scatter schematic

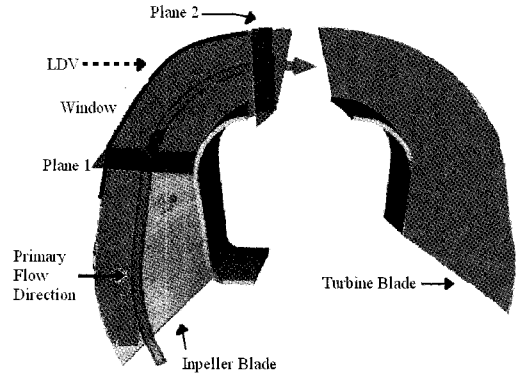


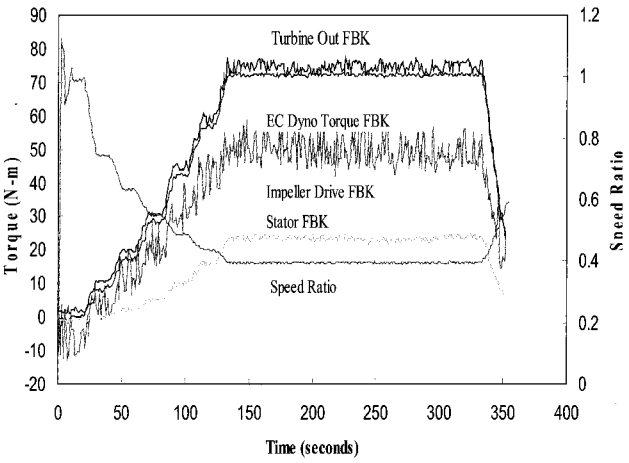
Fig. 3 View of impeller and turbine blades inside the torque converter with measured planes

2.3 LDV 관측창

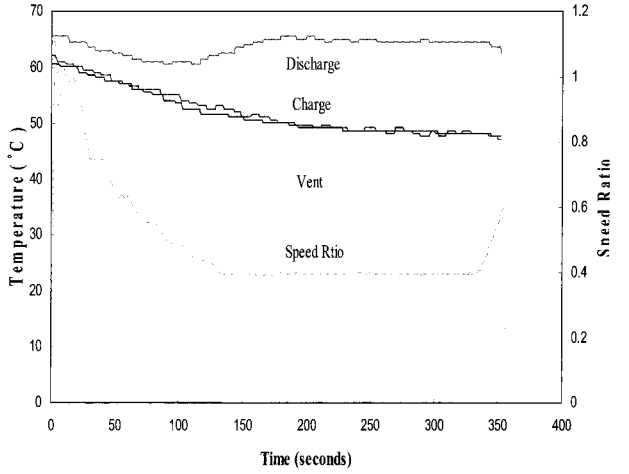
토크 컨버터의 임펠러는 엔진의 동력에 의한 유체의 펌핑을 Fig. 3에 표시한 것과 같이 반경 방향인 주 유동방향(primary flow direction)으로 수행한다. 레이저 유속계를 이용한 임펠러 유로의 중간부분과 출구부분의 주 유동방향 유동장 측정은 광학적으로 투명한 플렉시글래스로 제작·설치된 정면 관측창(front window)과 측면 관측창(side window)을 통하여 가능하였다. 관측창은 양산되는 동일한 모델의 승용차용 토크 컨버터 2개를 부분적으로 가공한 후 각각 설치하였다. 정면 관측창은 임펠러 유로의 중간부분에서 주 유동방향에 수직한 단면($Plane\,1$)의 유동장 측정을 위하여 사용하였으며, 측면 관측창은 임펠러 유로의 출구부분에서 주 유동방향에 수직한 단면($Plane\,2$)의 유동장 측정을 위하여 사용하였다. Fig. 3은 주 유동방향에 수직한 각 측정단면의 위치를 나타낸다. 관측창 내부표면은 토크 컨버터 형상과 동일하게 정밀 가공하여 관측창의 설치가 내부유동에 영향을 미치지 않도록 하였다. 관측창 내부의 표면형상은 매우 복잡함으로 관측창의 재질은 변속기오일의 굴절률(refractive index)과 같아야하며 이것은 레이저 유속계 측정에서 매우 중요한 사항이다.

2.4 실험 절차

앞장에서 언급한 관측창이 설치된 토크 컨버터의 운전성능 확인을 위하여 입력 토크를 67.8 Nm로 일정하게 유지하면서 일련의 성능테스트를 실시한 후 본래의 토크 컨버터와 비교하였다. 테스트는 터빈의 회전속도 400~2000 rpm 범위에서 실시하였다. 순환 변속기오일의 압력, 온도, 유동율과 각 축의 토크를 기록하여 K-계수와 효율을 구한 후 서로 비교하였다. 터빈의 회전속도 최대편차는 6% 보다 작았으며, K-계수는 오차가 5% 보다 작아 본래 토크 컨버터의 값과 잘 일치하였다[8].



(a)



(b)

Fig. 4 Torque measurements (a) and recorded temperature (b)

실험에 의한 연구에서 토크 컨버터를 안정적인 상태로 운전하는 것은 매우 중요하다. 따라서 임펠러와 터빈의 회전 속도를 오차범위 ±1 rpm 으로 일정하게 유지하기 위하여 컴퓨터 제어 시스템을 사용하였다. 또한 제어 시스템은 변속기 오일의 유동율, 압력, 온도를 모니터하며 임펠러, 터빈, 정익축의 입력과 피드백 토크를 측정하였다. 제어 시스템의 자료는 모두 컴퓨터에 저장되며, Fig. 4는 속도비가 0.4의 일정한 값으로 유지될 때 저장된 자료의 일부를 나타낸다. Fig. 4(a)는 제어 시스템이 터빈을 75~80 Nm, 유니버설 동력계는 75 Nm, 임펠러는 48~57 Nm, 정익은 27 Nm의 토크 값으로 일정하게 유지하는 것을 보여주며, Fig. 4(b)는 변속기 오일의 온도가 토크 컨버터에서 유출될 때 65 ℃, 유입될 때와 냉각장치에서 방출될 때 50 ℃의 값에 접근하는 것을 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

임펠러 유로의 중간영역과 출구영역의 유동장 측정을 속도비 0.4 조건에서 실행하였다. 연속적인 전체 터빈 유로에 대한 앙상블평균속도(ensemble averaged velocity)값은 각 측정단면의 주 유동방향 속도분포를 나타내는데 사용하였다.

3.1 측정단면 1의 속도분포

Fig. 5는 임펠러 유로의 중간영역인 측정단면 1의 주 유동방향 속도분포를 나타낸다. 측정단면은 지면 오른쪽의 압력면(pressure side)에서 왼쪽의 흡입면(suction side) 방향으로 회전한다. 측정단면 1의 속도분포는 흡입면에서 압력면 쪽으로 완만하게 크기가 감소하는 매우 균일한 유동장 분포를 보인다. 슈라우드와 쉘을 따라서 속도는 거의 동일한 분포를 보이다가 압력면 코너에서 약간의 차이를 나타낸다. 측정단면 1에서 특별한 재순환유동은 나타나지 않았다. 높은 속도분포는 유로의 흡입면을 따라 관찰되며 그 크기는 7~8 m/s 이다. 흡입면을 따라 나타나는 균일하고 높은 속도분포는 유체가 정익에서 임펠러로 유입될 때 흡입면 쪽의 운동량이 압력면보다 높은 것으로부터 발생하는 것으로 생각된다.

Lee 등[5]은 속도비가 0.8인 경우 동일한 측정단면에서 전혀 다른 유동분석을 보고하고 있다. 측정단면 1의 높은 속도영역은 흡입면/쉘 코너에 있으며, 압력면을 따라서 쉘부터 슈라우드까지 속도가 감소하면서 확장하는 것을 보고하고 있다. 또한, 흡입면/슈라우드 코너부분의 유동장에 -1~2 m/s 크기의 강한 역류현상을 보이는 유동패턴이 발생하고, 이러한 특징이 압력면 부근에서는 나타나지 않는 것을 보고하고 있다. 박리에 의한 재순환유동은 주 유동방향으로 상당한 두께를 가지고 있는 것으로 판단되며, 실제 순환이 발생하는 유동면적은 줄어들게 되어 유효 유로 폭은 측정단면의 약 80% 정도로 줄어드는 것으로 보고하고 있다. 재순환유동의 발생은 임펠러 유로 측정단면에서 양의 질량유동이 일어나지 않기 때문에 터빈 쪽으로 운동량 전달에 손실을 유발하며, 따라서 주된 에너지손실의 원인이 될 수 있다. 흡입면 방향의 중간 부분은 속도비 0.8에서 높은 속도영역과 역류영역이 교차하는 곳으로서 많은 에너지손실이 예상된다. 실제 이 문제는 Gruver 등이 보고한 흡입면/슈라우드 코너의 슈라우드 부근 역류와도 일치한다.

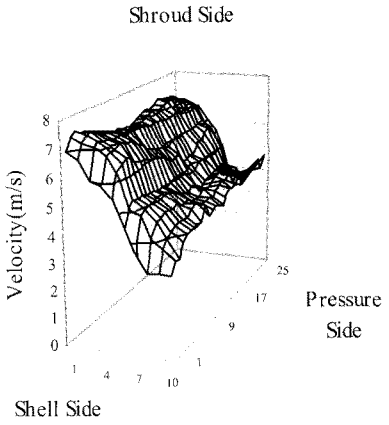


Fig. 5 Velocity distribution from Plane 1 for the 0.4 speed ratio

측정단면 1의 유동장을 속도비에 따라 비교하면 재순환유동은 속도비가 0.4인 경우에는 발생하지 않는 반면, 속도비가 0.8인 경우에는 흡입면/슈라우드 코너부근의 넓은 영역에서 강하게 발생하는 것을 알 수 있으며, 속도비 0.4에서는 흡입면을 따라 많은 유량이 비교적 균일하게 집중하다가 속도비가 0.8로 증가하면 속도분포가 불균일해지는 것을 알 수 있다[5]. 즉, 속도비의 변화와 함께 발생하는 재순환유동과 유동장의 특성 변화는 속도비가 증가하면 질량 유동율은 큰 폭으로 감소하는 Table 1의 유성출 등[8]의 연구 결과와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

Table 1 Mass flow rate data in Plane 1 and 2

0.4 Speed Ratio				0.8 Speed Ratio			
Plane 1		Plane 2		Plane 1		Plane 2	
Max.	1.52 kg/s	Max.	0.44 kg/s	Max.	1.16 kg/s	Max.	0.17 kg/s
Min.	1.43 kg/s	Min.	0.38 kg/s	Min.	1.11 kg/s	Min.	0.12 kg/s

3.2 측정단면 2의 속도분포

Fig. 6은 임펠러 유로의 출구영역인 측정단면 2의 주 유동방향 속도분포를 나타낸다. 측정단면은 지면 오른쪽의 압력면(pressure side)에서 왼쪽의 흡입면(suction side) 방향으로 회전한다. 측정단면 2에서는 속도비가 0.4인 경우 슈라우드의 반대쪽에 있는 쉘 표면 부근 영역에서 표면을 따라 좁은 띠 모양으로 음의 유동영역이 형성되며, 쉘 표면 중간부분 1/3 넓이의 영역에서 -2.0 m/s 크기의 최소값이 관찰된다. 측정단면 2에서 관찰되는 쉘 표면 바로 밑의 역류현상은 임펠러 유로 출구로부터 상당한 거리까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 쉘 부근 음의 유동장은 속도비 0.8인 경우 측정단면 1에서 발생하는 재순환유동과 전혀 다른 특성을 보였다. 신세현 등[7]은 펌프의 압력분포는 입구에서 출구 쪽으로 진행하면서 회전중심의 반경거리에 비례하여 완만하게 증가하며, 펌프와 터빈의 출입구 부위의 쉘 쪽에 가장 큰 값을 나타낸다고 보고하고 있다. 따라서 측정단면 2의 쉘 부근에 발생하는 음의 유동영역은 높은 정압영역의 영향으로부터 일어나는 것으로 생각된다. 양의방향 속도성분 중에서 최소값은 흡입면에 근접한 쉘/슈라우드 중간부분에서 관찰할 수 있다. 속도분포는 압력면/슈라우드 코너부터 흡입면/쉘 코너를 향하여 거의 선형적으로 속도가 감소한다. 높은 속도분포는 유로의 슈라우드/압력면 코너부분에 형성되는 것을 볼 수 있다.

한편, 속도비가 0.8인 경우 측정단면 2의 유동패턴은 압력면부터 흡입면 쪽으로 거의 선형적으로 속도가 감소하며, 최고속도는 유로의 압력면을 따라 분포하고 역류도 압력면에서 흡입면 방향으로 약 2/3 거리부터 형성되는 영역에서 발생하는 것으로 Lee 등[5]은 보고하고 있다. 출구영역인 측정단면 2에서도 속도비에 따라 변화하는 질량 유동율이 유로 단면의 유동장 특성과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

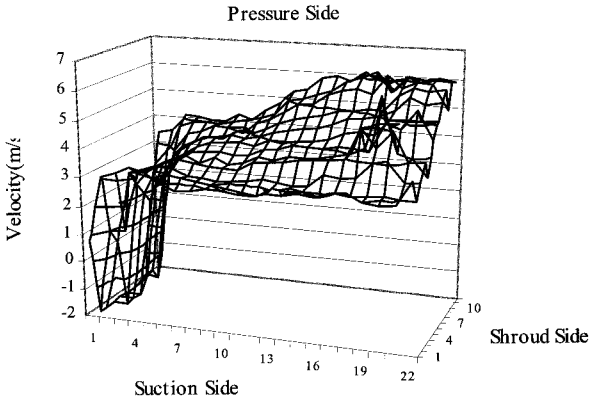


Fig. 6 Velocity distribution from Plane 2 for the 0.4 speed ratio

4. 결 론

임펠러 유로에서 유동특성을 정확하게 파악하는 것은 토크 컨버터의 성능을 향상시키는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 유동장의 해석을 통해 속도비에 따른 내부유동의 형태를 파악할 수 있었고, 특히 재순환유동의 발생 여부를 관찰할 수 있었다. 다수의 실험 연구는 임펠러 유로의 중간 부분 슈라우드표면에서 유동의 박리를 보고하였고, Lee 등[5]은 속도비 0.8에서 흡입면/슈라우드 코너부분에서 박리에 의한 재순환유동의 발생을 관찰하였으나, 속도비 0.4의 조건으로 측정단면 1에서 유동패턴을 분석한 본 연구에서는 유동박리와 재순환유동을 볼 수 없었다. 이 현상은 임펠러 유로를 통과하는 질량 유동율과 깊은 관계가 있는 것으로 판단된다. 유동특성은 임펠러 유로 단면과 속도비에 따라서 많은 차이를 나타낸다. 이러한 사실은 토크 컨버터의 최적설계에 중요하게 고려되어야 할 것이다. 특히, 운전조건에 따라 임펠러 유로에서 발생하는 박리에 의한 유동재순환과 출구영역의 역류는 유효 유로폭을 감소시켜 결과적으로 주된 에너지손실의 원인이 될 수 있다. 수치해석을 통한 토크 컨버터 설계 시 이러한 현상이 모두 고려되지 않을 경우 오차가 존재할 수 있다는 것을 알려준다. 따라서 토크 컨버터 설계 시 이 현상에 대한 대책마련이 필요하고, 이것은 토크 컨버터의 설계이론에 필수적으로 고려되어야 할 것이다.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 Schock 교수님과 이

근철 박사님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. W. Fister and F. W. Adrian, 1983, "Experimental Researches of Flow in Hydrodynamic Torque Converters", Proceeding of the 7th Conference of Fluid Machinery in Budapest, Hungary, Vol. 1, pp. 210~224.
2. R. R. By and J. E. Maloney, 1988, "Technology Needs for the Automotive Torque Converter-Part 1: Internal Flow, Blade Design, and Performance", SAE Paper No. 880482.
3. H. M. Bahr et al., R. D. Flack, R. R. By and J. J. Zhang, 1990, "Laser Velocimetry Measurements in the Stator of a Torque Converter", SAE Paper No. 901769.
4. R. R. By and B. Lakshminarayna, 1995, "Measurement and Analysis of Static Pressure Field in a Torque Converter Pump", Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, pp. 109~115.
5. Keunchul K. Lee, Seoung-Chool Yoo and Harold J. Schock, 2000, "Quantification of Primary Flows of a Torque Converter Using Laser Doppler Velocimetry", SAE Paper No. 2000-05-0106.
6. 김홍식 외 3인, 1998, "자동차용 토크 컨버터의 수치해석적 연구(Part 1)", 한국자동차공학회논문집, 제6권, 제5호, pp. 28~36.
7. 신세현, 안희학, 이태경, 1998, "3차원 유동해석을 통한 토크 컨버터의 성능분석", 한국자동차공학회논문집, 제6권, 제6호, pp. 15~23.
8. 유성출, 장성국, 2008, "토크 컨버터 유동특성에 대한 연구", 한국동력기계공학회지, 제12권, 제5호, pp. 20~26.