

토크 컨버터 내부 유동장의 실험적 연구

유성출[†]

An Experimental Study of Flow Field in a Torque Converter

S. C. Yoo

Abstract. The flow field measurements were conducted on the planes between impeller blades, and the gap between the impeller and turbine blades under speed ratio of 0.4. The study showed that high velocity regions move from locations near the suction surface of the impeller to the pressure blade, shroud corner as flow progresses from the mid-chord of impeller passage to exit and out into the gap region. Planes 3 through 5 also showed flow reversal occurring in the area near the shell surface and progress far into the impeller passage from the impeller passage exit, near shell surface. This affected the converter efficiency negatively. This study would aid in the construction of higher accuracy CFD models of this complex turbomachinery device.

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

1. 서 론

토크 컨버터 설계기술 개발에 있어 가장 중요한 부분의 하나는 운전조건에 따른 내부 유동장의 정확한 해석기술 확보이다. 토크 컨버터의 전체적인 성능은 외경 치수와 각 요소의 조건에 의해 어느 정도 결정되지만, 내부 유동장의 영향을 크게 받는다. 토크 컨버터는 엔진 구동에 의한 임펠러의 회전이 내부에 채워진 변속기오일에 원심력을 제공하게 되고 이에 따라 유체는 임펠러 유로에 의해 안내되어 반경 방향의 운동량을 갖고 임펠러를 떠나게 된다. 터빈은 운동량을 받아 변속기에 전달해 주고, 터빈을 떠난 변속기오일은 정익을 통과하면서 안내를 받아 다시 임펠러로 들어간다. 이와 같이 내부를 순환하는 변속기오일이 동력전달의 매체로서 작용하기 때문에 각 요소의 유동장 특성은 토크 컨버터의 성능에 크게 영향을 미치는 중요한 인자로 인식되고 있다. 따라서 토크 컨버터의 성능을 향상시키기 위해서는 토크 컨버터의 특성을 지배하는 순

환류에 대한 정확한 유동장 해석이 요구된다. 최근의 유동해석은 전산유체역학(CFD)의 발전에 힘입어 활발하게 진행되고 있으나 그 내용은 대부분이 설계인자 등이 최종효율에 미치는 영향을 설명하고 있어 유동학적인 측면에서는 만족스럽지 못한 상황이다. 또한, 양산되는 토크 컨버터에 대한 직접적인 유동장 측정은 복잡한 내부구조 및 3차원적이며 강한 난류현상과 이차유동 등의 특성으로 실험에 많은 시간, 노력 및 인력이 필요하고 항상 새로운 하드웨어의 제작이 요구되므로 아직도 어려운 실정이다. 그러나 토크 컨버터 연구의 최종 지향점은 토크 컨버터 각 부위의 유동특성에 대한 해석과 이로부터 파생된 최종효율 및 여러 특성에 대한 연관 관계 규명 및 제어기술 개발임을 생각할 때 이를 위하여 유동특성에 대한 보다 분석적인 접근이 요구되고 있다.

기존의 양산되는 토크 컨버터에 대한 실험기반 주요 연구 결과를 살펴보면 Lee 등⁽¹⁾은 토크 컨버터의 임펠러 유로 유동장에 대한 실험적 고찰을 통해 임펠러 유로의 설계에 내부 유동장 특성을 고려해야 한다는 점을 확인하였고, 특정 단면에 발생하는 재순환유동과 역류를 가시화하였다. 임펠러 유로의 최적화를 통하여 내부

[†]한라대학교 기계자동차공학부
E-mail : scyoo@halla.ac.kr

유동장을 개선함으로써 토크 컨버터의 성능 및 효율을 향상시킬 수 있음을 전망하였다. Yoo 등^(2,3)은 LDV를 이용한 실험적 해석 방법에 의해 토크 컨버터의 속도비가 유동장에 미치는 영향을 분석하여 임펠러 유로의 특정영역에서 발생하는 재순환유동은 질량 유동율과 관계있는 것을 확인하였다. 그밖에 토크 컨버터에 대한 많은 연구 결과가 있으나 정량적인 측면보다는 정성적인 면에서 일반 유동특성을 이해하는데 도움을 줄 수 있고 이에 따라 토크 컨버터가 실제 작동하는 경우에 적용하기에는 한계를 가진다는 아쉬움이 있다⁽⁴⁻⁹⁾. 국내에서는 대부분이 주로 수치해석과 실험에 의한 성능 측정 결과의 비교가 보고되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 레이저 유속계 측정을 통해 승용차용 토크 컨버터 임펠러 유로의 중간·출구영역과 임펠러와 터빈 사이영역의 유동장 및 재순환 유동 등에 대한 해석을 속도비 0.4 조건에서 시도하고자 한다. 지금까지 국내의 연구는 대부분 수치해석에 의존하는 방법으로 토크 컨버터에 관한 기술을 축적시켜 왔기 때문에 토크 컨버터 내부의 국지적인 부분의 유동특성과 전체적인 성능특성을 연결하는 분석기술이 충분하지 못한 단점이 있어왔다. 본 연구를 통해 얻어질 자료는 이 단점을 보충하는데 일조할 것으로 기대된다. 특히 본 연구를 통해 토크 컨버터의 여러 유동특성 중 임펠러 유로의 주 유동방향에 대한 실험적인 자료를 시각적 관점에서 보여주고 정량적 해석을 통해 속도비가 토크 컨버터의 내부 유동장에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치의 구성

실험 장치는 Fig. 1과 같이 토크 컨버터 설치대, 대판(bedplate), 40 kW 직류모터와 40 kW 유니버설동력계(universal dynamometer)로 구성하였다. 토크 컨버터는 직류모터로 구동하였으며, 유니버설 동력계는 부하조건을 위하여 사용하였다. 구동모터는 2500 rpm까지 속도변환이 가능하며 2:1 비로 연결된 벨트에 의하여 임펠러를 5000 rpm까지 회전시킬 수 있다. 유니버설 동력계는 피동축에 연결된 터빈을 5000 rpm까지 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

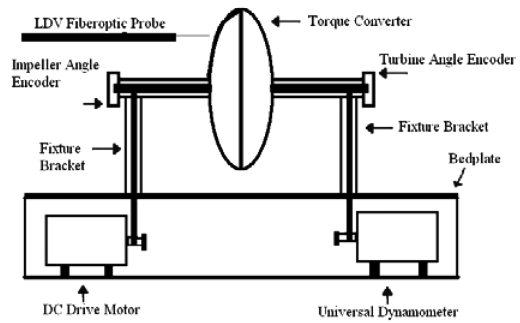


Fig. 1. Schematic of test rig assembly.

기록하였다.

본 연구에서 임펠러는 1600 rpm으로 고정하고 터빈은 속도비 0.4를 유지하도록 633 rpm으로 하였다. 변속기오일의 온도는 실제 승용차 운전조건과 동일하게 유지하기 위하여 수냉식으로 작동되는 온도 제어장치를 제작하여 사용하였다. 또한 임펠러와 터빈축의 양 끝에는 앵글 인코더(angle encoder)를 설치하여 토크 컨버터 운전 중에 위치를 알 수 있었다.

2.2 레이저 유속계

레이저 유속계는 4 W 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 금속코

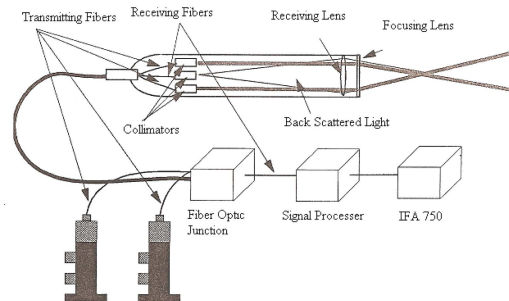


Fig. 2. Back scatter schematic.

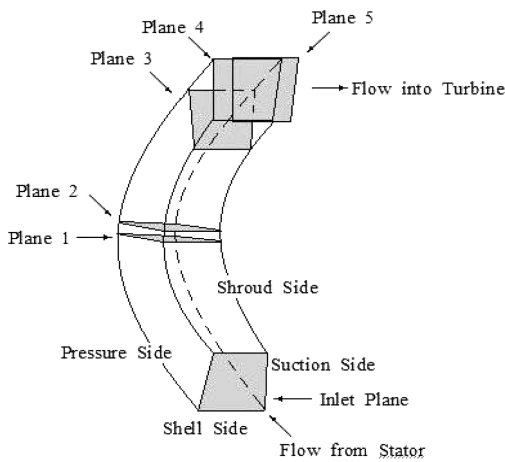


Fig. 3. Impeller blade passage geometry with measured planes.

팅(metallic coated)된 지름 9 μm 크기의 입자이다⁽¹⁾.

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 중간·출구영역과 임펠러와 터빈 사이의 주 유동방향 유동장 측정은 광학적으로 투명한 플렉시글래스(굴절률: 1.490)로 제작설치된 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 중간영역의 유동장 측정을 위하여 사용하였으며, 측면 관측창은 임펠러 유로의 출구영역과 출구에서 터빈 방향의 유동을 측정하기 위하여 사용하였다. 관측창의 내부 표면은 토크 컨버터의 형상과 동일하게 정밀 가공하여 관측창의 설치가 내부 유동에 영향을 미치지 않도록 하였다. 관측창 내부의 표면 형상은 매우 복잡함으로 사용한 변속기오일(굴절률: 1.489)은 관측창 재질의 굴절률과 거의 일치하도록 선택하였으며 이것은 레이저 유속계 측정에서 매우 중요한 사항이다.

2.4 실험 방법

관측창이 설치된 토크 컨버터의 운전성능 확인을 위

하여 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 자동변속기가 장착된 차량의 성능을 대표하는 성능지수인 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⁽²⁾.

실험에 의한 연구에서 토크 컨버터를 안정적인 상태로 운전하는 것은 매우 중요하다. 따라서 임펠러와 터빈의 회전속도를 오차범위 ± 1 rpm으로 일정하게 유지하기 위하여 컴퓨터 제어시스템을 사용하였다. 또한 제어시스템은 변속기오일의 유동율, 압력, 온도를 모니터링하며 임펠러, 터빈, 정익 축의 입력과 피드백 토크를 측정하였다. 제어시스템의 자료는 모두 컴퓨터에 저장되며, Fig. 4는 속도비가 의 일정한 값으로 유지될

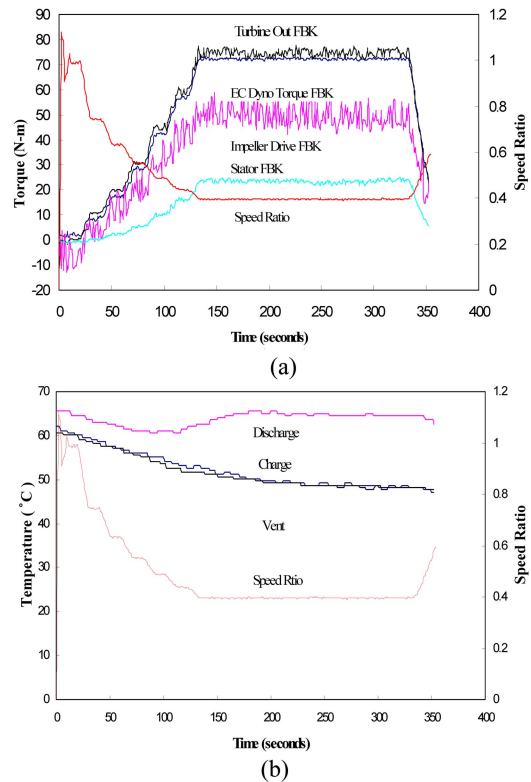


Fig. 4. Torque measurements (a) and recorded temperature (b).

때 저장된 자료의 일부를 나타낸다. Fig. 4(a)는 제어시스템이 토크를 일정하게 유지하는 것을 보여주며, Fig. 4(b)는 변속기오일의 온도가 토크 컨버터에서 유출될 때 65°C, 유입될 때와 냉각장치에서 방출될 때 50°C의 값에 접근하는 것을 나타낸다.

LDV측정은 5개의 서로 다른 각각의 측정단면에서

실시하였다. 측정단면은 임펠러 유로의 주 유동방향 중심선에 수직인 단면이다. 측간영역에 있는 측정단면 1과 2의 LDV 측정은 정면 관측창을 통하여 이루어졌다. 측정단면 1과 2는 회전축으로부터 반경 91.5 mm와 93.7 mm 위치에 있으며, 이는 임펠러 유로의 입구와 출구 사이의 중간부분이다. 임펠러 유로의 출구에서 입구 쪽으로 4.5 mm(측정단면 3)와 1 mm(측정단면 4) 위치에 있는 출구영역과, 임펠러 유로의 출구에서 터빈 방향으로 1 mm(측정단면 5) 위치에 있는 사이영역의 LDV 측정은 측면 관측창을 통해 각각 실시하였다. 유동분포의 특성과 변화를 효과적으로 분석하기 위하여 측정단면 1에서는 504곳, 측정단면 2에서는 544곳, 측정단면 3에서는 247곳, 측정단면 4에서는 286곳, 측정단면 5에서는 520곳에서 속도계측을 하였다. 측정단면의 위치는 Fig. 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

앞장에서 언급한 실험 장치를 통해 토크 컨버터 유로에서 일어나는 유동장을 가시화 하였다. 유로의 주 유동방향에 따른 유동특성의 변화에 주안점을 맞춰 유동의 정량적인 패턴을 관찰하였다. 측정단면은 지면 오른쪽의 압력면(pressure side)에서 왼쪽의 흡입면(suction side) 방향으로 회전한다. 각 측정단면의 속도 분포는 연속적인 전체 임펠러 유로에 대한 앙상블평균 속도(ensemble averaged velocity)값이다.

Fig. 5(a)는 측정단면 1의 주 유동방향 속도분포를 보여주고 있다. 유동장은 흡입면에서 압력면 쪽으로 완만하게 속도가 감소하는 비교적 균일한 분포를 보인다. 셸(shell)을 따라서 속도는 거의 비슷한 크기의 분포를 보이지만, 슈라우드(shroud)를 따라서는 압력면과 흡입면 중간 부분에 속도가 약간 감소하는 차이를 나타낸다. 측정단면 1에서 재순환유동은 나타나지 않았다. 속도비 0.8 조건⁽¹⁾에서 나타난 재순환유동 영역에는 오히려 높은 속도영역이 관찰된다. 유로의 흡입면을 따라서는 크기가 7~8 m/s의 비교적 균일한 높은 값의 속도분포가 관찰되지만, 속도비가 0.8인 경우에는 높은 속도분포가 흡입면/셸 코너에는 그대로 있으나 반대편에 있는 흡입면/슈라우드 코너부분의 유동장에서는 강한 역류현상을 보이는 유동패턴이 발생하였다⁽¹⁾. 속도비 0.4에서는 흡입면을 따라 많은 유량이 비교적 균일하게 집중하다가 속도비가 증가하면서 흡입

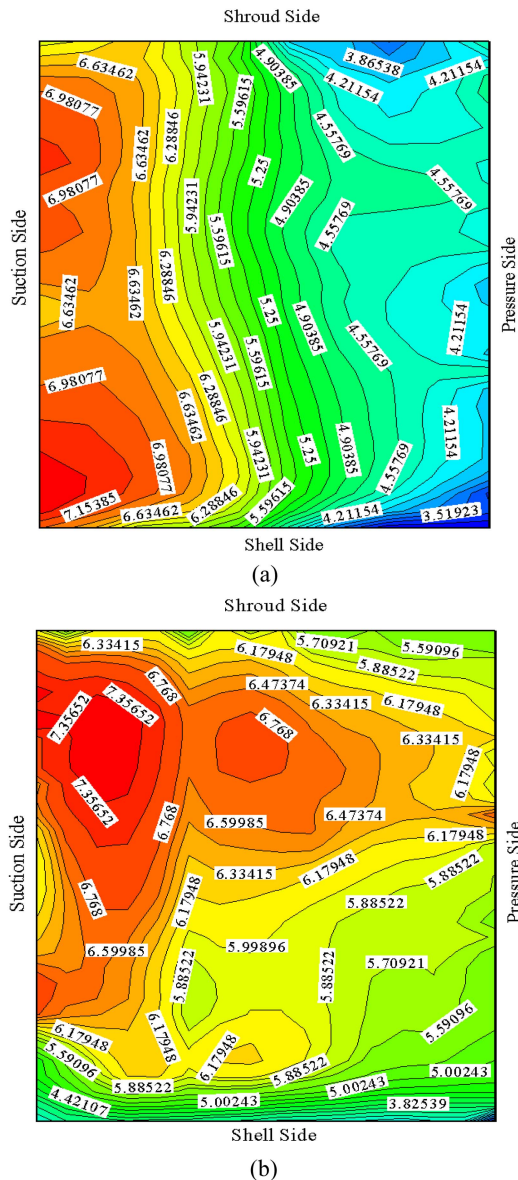


Fig. 5. Velocity distributions in the mid-chord region for the 0.4 speed ratio.

면을 따라 나타나는 균일하고 높은 속도분포는 매우 불균일해 지는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 측정단면 2의 주 유동방향 속도분포를 보여주고 있다. 측정단면 2의 속도분포는 측정단면 1과 비교하여 전체적으로 비슷한 분포를 보이고 있으나, 차이점은 셸 근처에서 속도가 급격히 감소한다. 흡입면/셸 부분 코너에서 속도가 약간 증가하다가 갑자기 감

소하는 경향을 보이고 있다. 높은 속도영역은 측정단면 1에서와 같이 흡입면 쪽에 형성되지만 흡입면/슈라우드 코너 쪽으로 치우치는 경향을 보이고 있다. 또한, 주위의 속도보다는 약간 높은 값의 속도분포가 슈라우드와 셸의 중간 부분 압력면 쪽에 형성되는 것을 관찰할 수 있다. 측정단면 2에서의 높은 속도분포는 흡입면을 따라 슈라우드 쪽으로 형성되며 그 값은 8 m/s이다. 속도비 0.8 조건에서 나타난 높은 속도영역은 주로 유로의 압력면을 따라 형성되며 최고 속도는 압력면과 흡입면의 중간지점에서 셸 쪽으로 치우쳐있다⁽¹⁾. 이처럼 중간영역의 유동단면을 통과하는 유량의 속도분포는 균등하지 않고 더구나 속도비에 따라 변하기 때문에 수치해석을 통한 설계이론에 필수적으로 고려되어야 할 것이다.

Fig. 6(a)는 측정단면 3의 주 유동방향 속도분포를 보여주고 있다. 측정단면 3에서의 높은 속도분포는 중간영역에서 관찰된 것과 같이 흡입면을 따라 더 이상 형성되지 않고 셸을 따라 일정한 간격을 두고 분포하며 또한, 압력면/슈라우드 근처에 형성된다. 최고 속도는 4.2 m/s의 값이 압력면/슈라우드 코너에서 관찰된다. 낮은 속도분포는 흡입면 중간부분을 따라 형성된다. 음의 유동영역은 셸 표면을 따라 형성되며, 벽면 중간부분에서 -2 m/s의 최소값이 관찰된다. 관찰되는 셸 표면 바로 밑의 역류현상은 임펠러 유로 출구부터 상당한 거리까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 6(b)는 측정단면 4의 주 유동방향 속도분포를 보여주고 있다. 측정단면 4에서는 측정단면 3에서 관찰되던 셸을 따라 일정한 간격을 두고 분포하던 높은 속도영역이 없어지고 셸 표면 부근 영역에서 표면을 따라 좁은 띠 모양으로 음의 유동영역이 형성되며, 셸 표면 중간부분 1/3 넓이의 영역에서 -2 m/s의 최소값이 관찰된다. Shin 등⁽¹⁰⁾은 펌프의 압력분포는 입구에서 출구 쪽으로 진행하면서 회전중심의 반경거리에 비례하여 완만하게 증가하며, 펌프와 터빈의 출입구 부위의 셸 쪽에 가장 큰 값을 나타낸다고 보고하고 있다. 따라서 측정단면 3과 4의 셸 부근에 발생하는 음의 유동영역은 임펠러와 터빈 사이영역의 유동특성 영향으로부터 발생하는 것으로 생각된다. 양의방향 속도성분 중에서 최소값은 흡입면에 근접한 셸/슈라우드 중간부분에서 관찰할 수 있다. 속도분포는 압력면/슈라우드 코너부터 흡입면/셸 코너를 향하여 거의 선형적으로 속도가 감소한다. 높은 속도분포는 유로의 압력면/슈

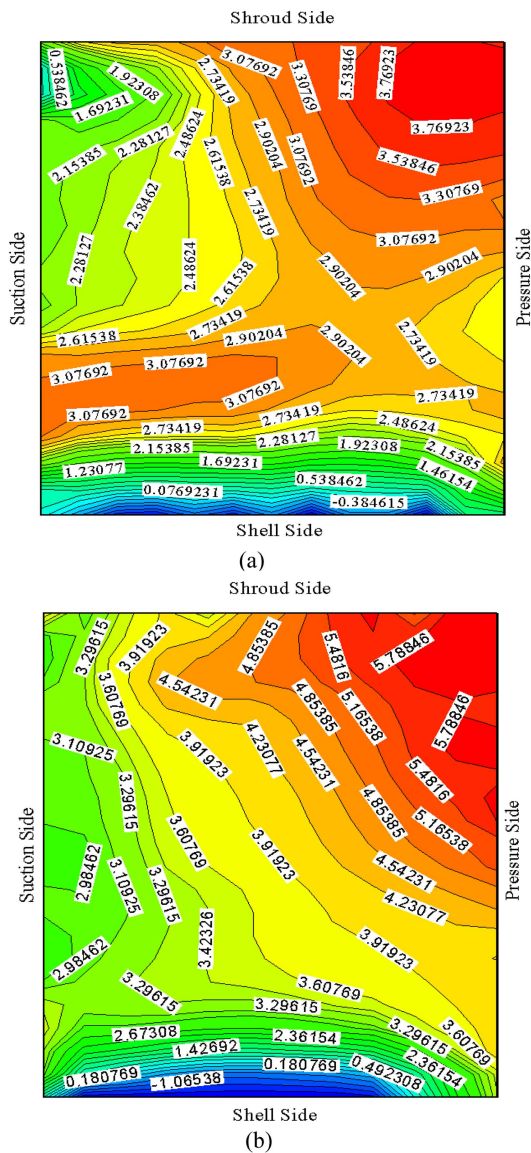


Fig. 6. Velocity distributions in the exit region for the 0.4 speed ratio.

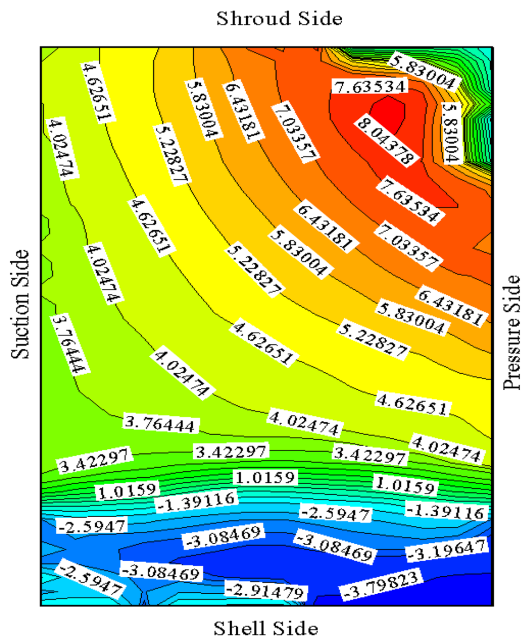


Fig. 7. Velocity distribution in the gap region for the 0.4 speed ratio.

라우드 코너부분에 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 측정단면 5의 주 유동방향 속도분포를 보여 주고 있다. 측정단면 5의 유동패턴은 임펠러 출구를 벗어난 유체가 터빈과 충돌하면서 일부는 임펠러 내부영역으로 흘러가는 특징을 보인다. 이 영역에서 발생하는 역류의 최소값은 속도비 0.8에서 관찰되는 -5 m/s 의 값보다 약간 작은 -4.4 m/s 이다. 임펠러 유로 셸 근처 측정단면에서 발생하는 음의 속도영역은 속도비 0.8의 경우보다 약간 확장하는 것을 관찰할 수 있으나, 속도비 0.8의 경우 흡입면을 따라 넓게 형성되는 음의 속도영역은 속도비 0.4의 경우에는 찾아볼 수 없었다⁽¹⁾. 최대 속도는 측정단면의 압력면/슈라우드 코너에 형성되며 그 값은 8.5 m/s 이다. 속도분포는 압력면부터 흡입면 쪽으로 거의 선형적으로 감소하며 최소값은 4 m/s 에 달한다. 임펠러와 터빈 사이영역의 유동패턴은 임펠러 출구영역의 유동패턴이 지속적으로 유지되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

토크 컨버터 유로에서 운전조건과 측정단면의 위치

에 따라 흐름의 모양을 정확하게 파악하는 것은 설계자에게 유용한 기준을 제공할 수 있으리라 생각된다. 본 연구에서는 기존의 토크 컨버터 유동장을 잘 분석한 바 있는 저자들의 실험 방법을 이용하여 토크 컨버터 속도비와 측정단면의 위치가 내부 유동장의 변화에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 속도비 0.4에서 행한 본 연구에서는 유동 박리와 재순환유동이 임펠러 유로의 중간영역인 측정단면 1과 측정단면 2에서 발생하지 않았다. 즉, 속도비 0.4는 유로내의 유동이 가속되도록 하여 박리를 일으키지 않게 하였다. 따라서 설계시 이 현상에 대한 고려가 필수적이고 이와 관련된 유동현상을 파악하는 것은 매우 중요한 문제이다.

2) 유동패턴을 측정단면 1부터 5까지 진행방향에 따라 관찰해 보면 임펠러 유로의 높은 속도분포는 중간영역인 측정단면 1에서는 흡입면을 따라 균일하게 분포하다가 측정단면 2에서는 흡입면/슈라우드 쪽으로 치우치는 경향을 보이며, 출구영역에서는 압력면/슈라우드 코너 쪽으로 이동하면서 유체가 방출되는 것을 알 수 있다. 이처럼 유동단면을 통과하는 유량의 속도분포는 균등하지 않고 속도비와 위치에 따라 변화한다.

3) 측정단면 3과 4의 유동장 특징은 유로의 반지름 방향을 따라 셸 근처에서 전단층(shear layer)이 발생하는 것이고, 측정단면 5에서 관찰되는 셸 근처 영역의 역류현상이 임펠러 유로 출구로부터 멀리 떨어져 있는 내부까지 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 속도비 0.8에서도 관찰되며 임펠러 출구를 벗어난 유체가 터빈과 충돌하면서 발생하는 것으로 생각된다.

후 기

본 연구에 많은 도움을 주신 Schock 교수님과 이근철 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Keunchul K. Lee, Seung-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.

- 2) S. C. Yoo and S. K. Jang, 2009, "A Study on the Flow Characteristics in a Torque Converter", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 12(5), pp. 20-26.
- 3) S. C. Yoo and S. K. Jang, 2009, "Flow Field Measurements in a Torque Converter (II)", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 13(6), pp. 82-87.
- 4) B. Lakshminarayna and T. W. Backstorm, 1996, "Perspective: Fluid Dynamics and Performance of Automotive Torque Converters: An Assessment", Journal of Fluids Engineering, Vol. 118, pp. 665-676.
- 5) J. K. Gruver, R. D. Flake and K. Brun, 1996, "Laser Velocimeter Measurements on the pump of an Automotive Torque Converter: Part I- Average Measurements", Trans. of ASME, Vol. 118, pp. 562-569.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) H. M. Bahr, 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.
- 9) 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.
- 10) S. Shin, H. H. Ahn and T. K. Lee, 1998, "Performance Analysis of a Torque Converter with Three Dimensional Flow Simulation", KSAE Paper No. 98370120.