

자동차용 토크 컨버터의 연구 기술 동향

박재인* · 조강래**

How to Study on Automotive Torque Converter

Jae-In Park*, Kang-Rae, Cho**

Key Words: Torque Converter(토크 컨버터), One-dimensional Analysis(1차원 해석법), Experimental Study(실험적 연구), Numerical Study(수치계산적 연구), Design(설계법)

ABSTRACT

The automotive torque converter is a complex turbomachine used to transfer power smoothly from an engine to a transmission. Its hydrodynamic design technology has been advanced very much during the past few years. A review of technologies for developing the torque converter was presented. In this paper, the technologies in the torque converter were divided into four parts: one-dimensional analysis, experimental study, numerical study, and new design method of the torque converter. In order to provide useful guidances to the torque converter designer, numerous papers published previously were incited and summarized briefly in this paper.

1. 서 론

자동차에 장착되고 있는 자동변속기(automatic transmission)는 크게 토크 컨버터부, 유성치차부, 제어부로 구성되어 있으며, 토크 컨버터는 유성치차부와 엔진 사이에 놓여 동력 전달의 단속 및 토크 증대의 두 가지 역할을 하는 터보기계로서 1905년 독일의 Foetinger에 의해 발명되었다. 토크 컨버터는 일반적으로 Fig. 1에 도사된 바와 같이 엔진의 크랭크축에 연결된 펌프와 변속기에 연결된 터빈 그리고 고정하우징에 일방향 클러치와 함께 고정된 스테이터의 세 가지 요소로 구성

되어 있다. 이들의 각 요소는 삼차원 형상을 갖으며, 내부 유동은 각 요소를 순차적으로 통과하는 순환류로 되어 있다.

토크 컨버터는 연속적이고 자동적인 토크 변환 특성을 가지기 때문에 미국과 일본을 비롯한 자동차 선진국에서는 생산차량의 90% 이상의 차량에 토크 컨버터가 장착된 자동 변속기가 탑재되어 있다. 우리나라에서도 생활수준이 향상되었고 교통사정이 악화됨에 따라 자동 변속기 자동차의 점유율은 높아져, 1995년도에는 약 50%에 이르렀다.

이러한 보급률의 증가와 더불어 엔진의 성능 및 연료 소비율에 직접 영향을 주는 토크 컨버터의 성능 향상이 큰 과제로 대두되었다. 또한, 록업(lock-up) 클러치의 채용과 횡치엔진의 전기관

* 연세대 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

(前機關)-전륜(前輪)구동차(FF car)에의 탑재를 위해 토리스 형상의 편평화의 경향도 현저해지고 있으며, 최근에는 Fig. 2와 같이 무단변속기(CVT)와 같은 새로운 변속장치에도 기존의 토크 컨버터가 응용됨에 따라 그 성능에 직접 관계하는 내부유동에 관한 상세한 정보가 요구되고 있다.

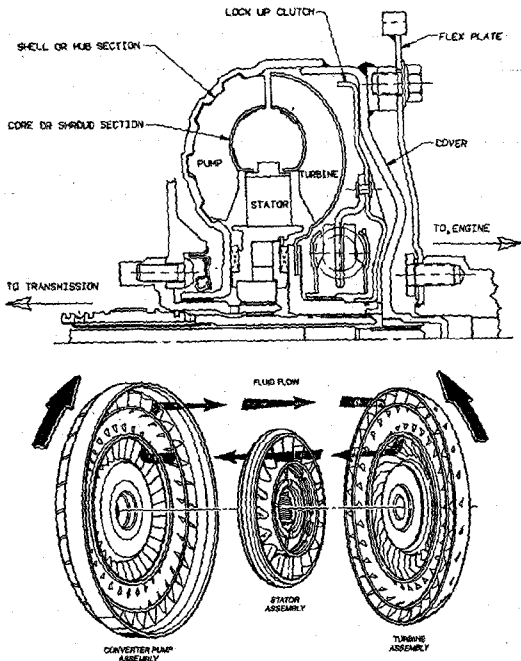


Fig. 1 Assembly of the automotive torque converter

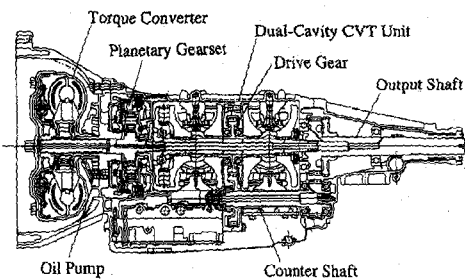


Fig. 2 CVT with torque converter

토크 컨버터는 자동변속기에서 약 15% 정도의 가격 구성비율을 가지며, 국외의 세계적인 완성차 제작사는 토크 컨버터를 직접 자체 생산하고 있다. 이 외에 토크 컨버터의 세계적인 제작사로는 SACH(독), EXEDY(일), JATCO(일), ZF(독) 등이 있다. 이에 비해 우리나라에서는 토크 컨버터의 설계도면을 외국에서 도입하여 제조기술 위주로 개발하고 있는 실정이다. 또한, 실차에의 탑재를 위한 토크 컨버터와의 매칭에 관련된 경험이 완성차 제작사와 국내의 토크 컨버터 제작사 사이에 공유되지 않고 있으며, 국내 기술에 대한 불신이 많을 뿐만 아니라 국가적인 차원에서의 지원 역시 매우 빈약한 수준이다. 그러나, 실제로 토크 컨버터의 연구 개발 비용은 큰 편이므로 국내의 중소기업에서는 시작품의 제작 기능 위주로 개발되고 있다. 최근에는 G-7의 차세대 자동차 기술 개발사업의 일환으로서 변속기 기반 기술 개발과제 및 무단변속기 개발과제 등이 수행되고 있다. 그러나, 이러한 연구조차도 산·학·정 사이의 역할 분담이 적절하지 못함에 따라 연구비 투자가 중복되어 낭비적인 요소가 많다고 할 수 있다.

본 해설에서는 자동차용 토크 컨버터의 연구 방법을 1. 일차원 해석법, 2. 실험적 연구, 3. 수치계산적 연구, 4. 설계법으로 구분하여 비교적 최근의 연구 결과를 위주로 정리하였다. 여기에서 기술된 각 연구 기법은 토크 컨버터에는 물론이고 다양한 터보기계에도 직접 적용할 수 있는 것을 취급하였다. 저자 등은 토크 컨버터에 관한 연구내용 및 방법들이 국내에서도 활발하게 이용되어 토크 컨버터와 기타 터보기계의 국산화에 기여되기 바란다.

2. 일차원 해석법

각운동량 이론에 기초한 일차원 단일 유선 해석법⁽¹⁾을 이용하면 토크 컨버터의 성능특성에 미치는 여러 가지 인자들의 영향을 평가할 수 있고

기본 치수 및 요소의 입·출구 날개각을 설계할 수 있다. 일차원 해석법은 Fig. 3과 같이 각 요소의 입·출구에서 속도삼각형을 이용하여 수력손실에 관한 모델을 가정하면, 토크 컨버터 내부의 순환유량을 대표하는 자오선 유속에 관한 방정식을 유도할 수 있다. 이러한 오일러식에 의해 각 요소의 성능이 계산된다.

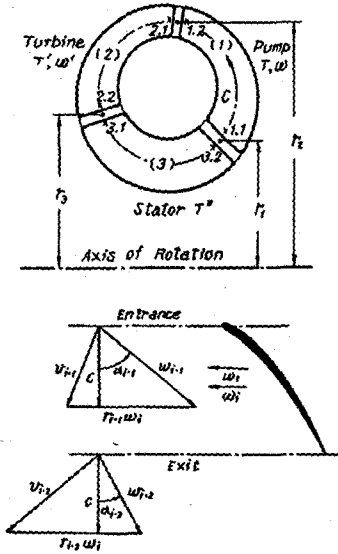


Fig. 3 Velocity diagram for one-dimensional analysis

각운동량 이론에 기초한 일차원 단일유선해석법을 이용하여 토크 컨버터의 성능 특성에 미치는 여러 가지 인자들의 영향을 평가하고 기본 치수 및 요소의 입·출구 날개각을 설계할 수 있다.

1955년 Ishihara⁽¹⁾는 모든 요소에서 총돌손실이 영(zero)이 되는 속도비와 이 때의 유량을 기준으로 하는 무차원 설계방법으로 각 요소의 날개각을 구하고 이의 성능을 제시하는 인자해석을 수행하였다. 1978년 Whitfield 등⁽²⁾은 무총돌 유입속도비와 실속점에서의 토크값을 선정하고 펌프 입구에서의 유량을 최대를 하는 날개각 설계방법을 제시하였다. 그러나, 1979년 Mercure⁽³⁾와 1988년 By와 Mahoney⁽⁴⁾는 토크 컨버터의 유동이 매우 강한 삼차원 유동이므로 토크 컨버터에

일차원 해석법을 적용하는 것은 부적당하다고 하였다. 1990년 Minato 등⁽⁵⁾은 Fig. 4에 제시된 순서도와 같이 스테이터의 내부 유동장을 이차원, 점성 유동으로 가정하여 수치계산하고 이 해석결과를 일차원 해석법에 연계하여 좀 더 정확한 성능 예측법을 개발하였다. 1991년 Kubo 등⁽⁶⁾은 Fig. 5와 같이 5공 피토크관을 이용하여 각 요소의 입출구 정지계에서 출구유동각 등을 측정하고 이 결과들을 일차원 이론에 적용하여 토크, 효율 및 수두계수 등을 산출함으로써 좀 더 개선된 성능 예측을 수행하였다.

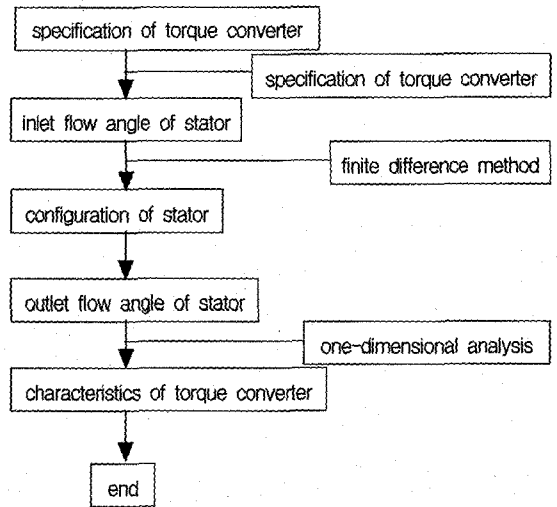


Fig. 4 Process of performance prediction combining FDM and 1-D analysis (Minato, et al., 1990)

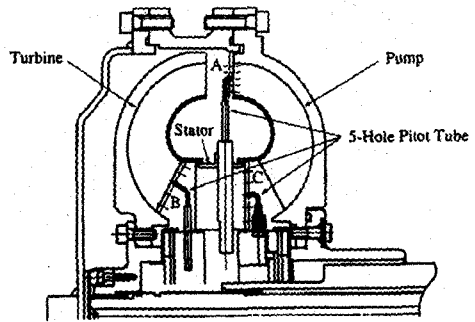


Fig. 5 Torque converter test rig with 5-hole pitot tube (Kubo, et al., 1991)

3. 실험적 연구

1962년 Jandasek⁽⁷⁾은 15년간 토크 컨버터의 실험적인 연구를 수행하여 많은 설계 데이터를 축적하였다. 그는 펌프 날개의 출구각에 대한 실속점에서의 토크비 및 토크용량과의 관계를 포함하여 속도비에 따른 토크비, 효율, 입력 회전속도, 토크용량에 관한 실험결과를 제시하였다.

1990년 Bahr 등⁽⁸⁾은 Fig. 6과 같이 토크 컨버터 전체를 플렉시글라스(plexiglas)로 제작하여 스테이터 내부의 유량, 입사각, 난류값 등을 일차원 레이저 유속계를 이용하여 측정하였다. 두 가지의 속도비 $e=0.065$ 와 0.800 에 대하여 5개의 준직교면 내의 속도장을 제시하였다. Fig. 7에 도시된 바와 같이 속도비 $e=0.800$ 인 경우, 중간 익현면의 코어 측 압력면에서 박리영역이 관찰되었으며, 출구면의 셸측 부압면에서 또하나의 박리영역이 존재함을 확인하였다. 또한, 측정된 유량과 토크는 일차원 해석법에 의한 결과와 상당히 큰 차이를 보였다.

By와 Lakshminarayana^(9,11) 및 By⁽¹⁰⁾는 토크 컨버터의 실제 작동조건을 모사하기 위해 Fig. 8과 같은 일련의 실험설비를 설계·제작하였다. 토크 컨버터로부터 수력학적 압력신호를 추출하기 위해 여러 가지 형식의 소형 압력 트랜스듀서가 시험 및 검정되었으며, 펌프와 터빈 회전계의 압력신호를 정지계로 전송하기 위하여 고정도의 슬립링이 사용되었다. 그들은 세 가지 속도비($e=0.0, 0.6, 0.8$)에 대해 압력장을 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다 : 1) 토크 컨버터의 전체 유로 내에서 코어와 셸 사이에는 큰역 압력구배가 존재하며, 일차원 해석법으로는 이러한 결과를 예측할 수 없다 ; 2) 모든 요소의 익면 정압분포는 일반적으로 코어쪽에서 불안정하다 ; 3) 원심력은 펌프와 터빈 내의 압력상승 및 강하에 중요한 영향을 미친다 ; 4) 각 요소 날개의 중앙 스패에서의 압력분포는 비점성 유동계산으로도 상당히 잘 예측될 수 있으나, 코어와 셸에서는 매우 부정확하다. 이에 대한 하나의 측정예로서 실속점($e=0.0$)에서의 펌프 정압분포를 Fig. 9에 도시하였다.

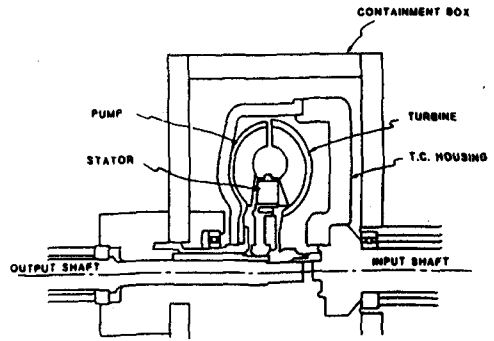
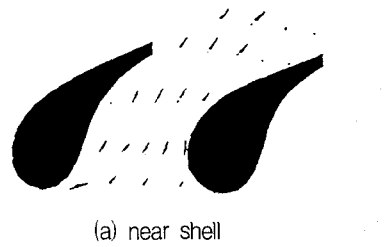


Fig. 6 Laser velocimetry for torque converter



(a) near shell



(b) near core

Fig. 7 Velocity distributions at two blade-to-blade sections under $e=0.800$ condition (Bahr et al., 1990)

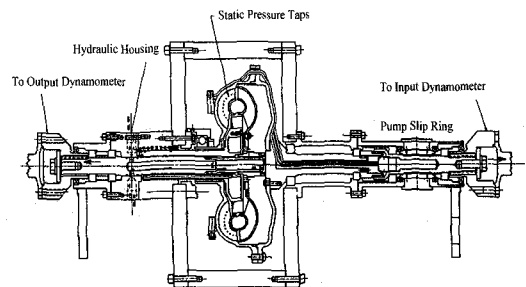


Fig. 8 Torque converter experimental facility for measuring pump static pressures (By, 1993)

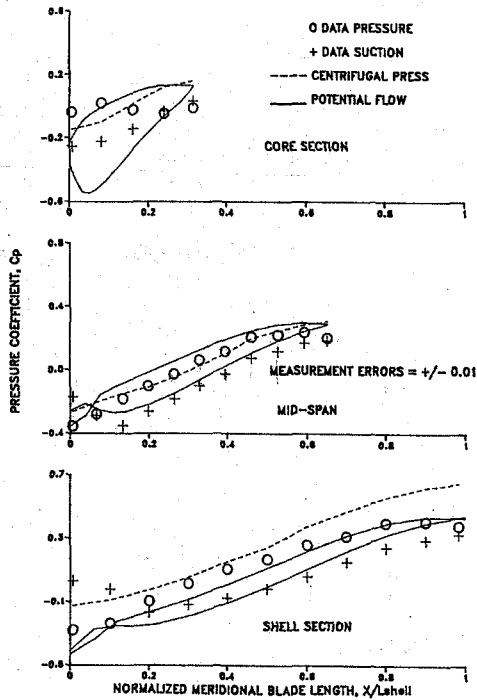


Fig. 9 Static pressure distribution of the pump blade under $e=0.0$ condition (By, 1993)

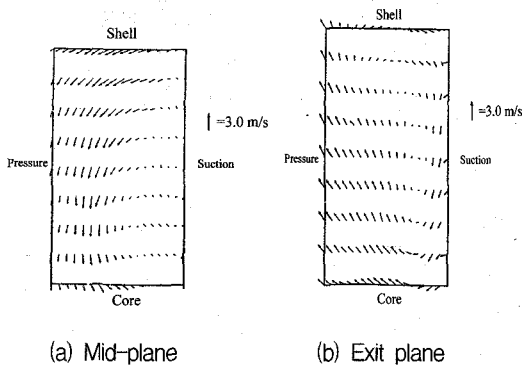


Fig. 10 Measured flow velocities of pump under $e=0.800$ (Gruver et al., 1996)

1996년 Gruver 등^(12,13)은 레이저 유속계를 이용하여 토크 컨버터의 펌프 내부의 속도장과 유량을 측정하고 토크와 미끄럼 계수 등을 산출하는 정상 및 비정상 측정실험을 수행하였다. 펌프 임펠러 내의 입구와 중간 익현 및 출구면에

서의 평균속도성분을 속도비 $e=0.065$ 와 $e=0.800$ 에 대하여 측정하였다. 속도비 $e=0.800$ 의 경우 Fig. 10과 같이 중간 익현면과 출구면에서 큰 박리영역이 관찰되었다. 두 속도비의 중간 익현면(Fig. 10(a))에서 반시계방향의 강한 이차유동이 발생하였으며, 이와 반대로 출구면(Fig. 10(b))에서는 시계방향의 강한 이차유동이 존재하는 것이 확인되었다.

1997년 Brun 등^(14,15)은 Gruver 등의 실험장치를 이용하여 토크 컨버터의 터빈 내의 삼차원 정상 및 비정상 속도장을 속도비 $e=0.065$ 와 0.800 에 대하여 측정하였다. 정상 유동장 측정결과로부터 터빈 내의 네가지 측정면중에서 1/4 익현면과 중간 익현면 사이의 코어-부압면 모서리에서는 박리 및 역류를 나타내는 매우 불균일한 유동영역이 존재함을 확인하였다. Fig. 11은 토크 컨버터의 실속 속도비 $e=0.065$ 에서 터빈의 1/4면과 중간면에서의 3차원 속도장을 도시한 것이다.

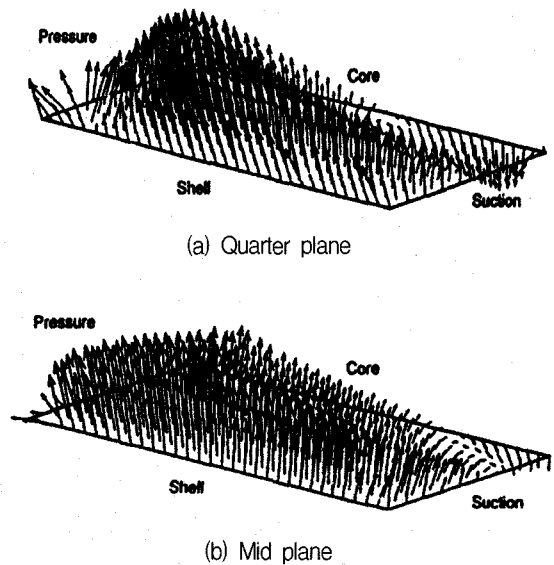


Fig. 11 Measured flow velocities of turbine under $e=0.065$ (Brun et al., 1997)

이러한 실험적 연구는 토크 컨버터의 각 요소가 삼차원적인 폐회로 형상이므로, 매우 어렵고

토크 컨버터의 설계 개발을 위해서는 상당한 비용과 시간이 요구되는 단점이 있다.

4. 수치계산적 연구

토크 컨버터의 유동장 해석을 위한 전산유체역학적인 접근은 1980년도에 시작되었으며, 1990년도에 들어서 활발하게 수행되기 시작하였다.

1988년 Fujitani 등⁽¹⁶⁾은 펌프, 터빈, 스테이터의 세 요소에 대해 각각 독립적으로 층류 점성 Navier-Stokes 방정식을 적용하여 수치계산에 의해 해를 구하였으며, 그 결과를 익면에서의 유동가시화의 결과와 비교하였다. 또한, 수치계산 결과로부터 산출된 토크 컨버터의 성능을 실험결과와 비교하였다. 이 연구의 경계조건은 Fig. 12와 같이 각 요소의 하류 경계 영역을 연장하여 연장된 출구 경계 위치에 Neumann 조건을 적용하는 방법을 택하고, 이와 같이 하여 계산된 각 요소 후연 위치에서의 결과들을 다음 요소의 입구조건으로 이용하여 반복 계산하였다. 계산의 수렴조건은 세 가지 요소에서의 압력손실이 일정치가 되는 것으로 하였다. 그러나, 이 연구에서는 순환유량의 처리방법 등을 포함하여 입구 경계조건 등에 대한 구체적인 기술이 없었다. 이 연구에서 토크 컨버터의 성능 특성은 계산결과와 실험결과에서 큰 차이를 나타냈으며, 내부 유동장에 대한 두 결과의 비교는 수행되지 않았다.

1991년 Abe 등⁽¹⁷⁾은 정상 간섭 기법(steady interaction technique)을 이용하여 각 요소를 독립적으로 계산하였다. 또한, 각 요소의 익면 후연 위치에 출구경계면을 두고 속도에 대한 Neumann 조건을 적용하였으므로 역류 발생의 경우 해의 정확성 및 계산의 안정성에 문제가 발생한다. 이 연구에서도 순환유량에 대한 구체적인 언급이 없었으며, 내부 유동장에 대한 계산결과와 실험결과와의 비교는 수행되지 않았다.

1993년 Tsujita 등⁽¹⁸⁾과 1995년 By 등⁽¹⁹⁾은 펌프 임펠러의 삼차원 난류유동해석을 수행하여, 그 내부유동이 이차유동을 포함한 복잡한 유동장

임을 확인하였다. 이 논문에서도 펌프 임펠러의 내부 유동해석을 위해 입구 경계조건으로 일차원 해석결과와 실험치가 사용되었다.

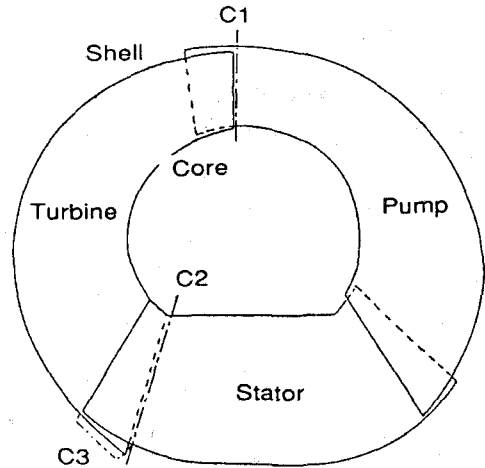


Fig. 12 Computational mode using overlaid mesh (Fujitani et al., 1988)

1995년 Cigarini 등⁽²⁰⁾은 Fig. 13에서와 같이 토크 컨버터 유로 내의 작동유체의 유출입, 토러스 중앙 영역에서의 작동유체의 누설, 터빈 케이싱과 토크 컨버터 케이싱 사이의 틈새 내의 작동유체의 유동까지 전체 계산격자에 포함시켜 STAR-CD라는 상용코드에 의해 계산된 토크 컨버터의 성능 및 부분적인 속도장을 실험결과와 비교하였으며, 정성적으로 그리고 정량적으로도 좋은 일치율을 보였다. 그러나 수치계산에서는 토크 컨버터 유로내의 유입 유량이 주어져야 했으며, 측정된 실험 데이터가 매우 제한적이었으므로 이 코드에 대한 검증은 매우 미흡하였다고 할 수 있다.

1995년 Tasaka 등⁽²¹⁾은 일차원 해석의 계산결과로부터 각 토크비에 대한 순환유량을 산출하고 이를 입구 경계조건으로 하여 삼차원 난류유동해석을 수행하였다. 계산결과는 가시화 실험결과와 유사함을 보였으나 토크비뿐만 아니라 특히, 토크용량의 정량적인 평가에는 Fig. 14에 제시된

바와 같이 큰 차이를 나타냈다. 이와 같은 차이는 일차원 이론에 의해 예측된 부정확한 순환유량을 수치계산의 입구 경계조건으로 적용하였기 때문이라고 할 수 있다.

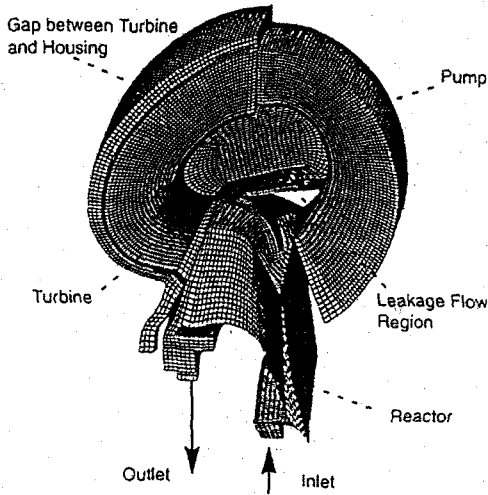


Fig. 13 Computational mesh (Cigarini et al., 1995)

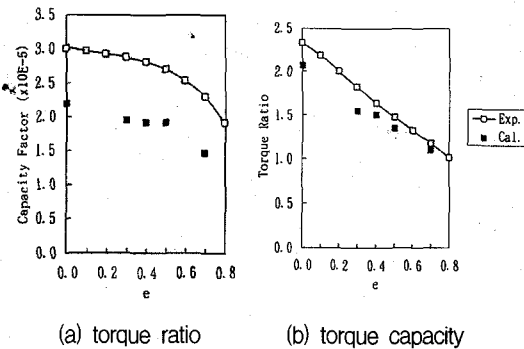


Fig. 14 Predicted and measured performances of torque converter (Tasaka et al., 1995)

1996년 Schulz 등⁽²²⁾은 펌프와 터빈 및 스테이터에 대한 정상 유동계산과 펌프와 터빈 사이의 비정상 간섭에 대한 수치해석 결과를 발표하였다. Fig. 15는 펌프와 터빈의 조합 익월에 대한 비정상 유동계산을 위한 격자계를 도시한 것이

며, Fig. 16에는 각 시간에서의 펌프와 터빈의 상대 위치에 따른 정압분포를 제시되어 있다. 이 연구의 결과로써, 스테이터 출구에서의 유동은 넓은 작동범위에서 상당히 균일한 속도분포를 보이고 있었으며, 펌프와 스테이터 및 터빈과 스테이터 사이의 유동간섭은 무시할 정도로 작지만 펌프와 터빈 사이의 비정상 효과는 중간스팬 위치에서 정상 상태의 속도분포의 약 30% 정도에 해당하는 비정상 효과가 나타남을 보였다. 이 논문에서 수치계산된 속도장은 부분적으로 실험결과와 비교되었고 제시된 계산결과는 세 요소 중 하나 또는 두 요소가 결합된 경우에 국한되어 있으며, 세 요소가 모두 결합된 토크 컨버터의 실제 상태에 대한 수치계산은 수행되지 않았다.

지금까지의 토의에서 알 수 있듯이 토크 컨버터의 유동장 계산에 도입된 과거의 수치계산 기법에는 크게 두 가지의 문제점이 내포되어 있다. 그 중의 하나는 경계영역의 위치선정과 경계조건을 적용하는 문제이며, 또 하나는 순환유량을 평가하는 방법이다. 이와 같은 문제점을 해소하고 토크 컨버터의 성능 및 유동장을 해석할 수 있는 계산기법이 저자 등^(23~24)에 의해 제안되었다.

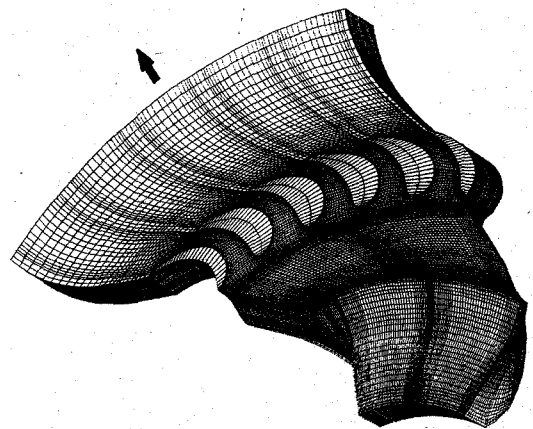


Fig. 15 Pump and turbine grid for unsteady calculation (Schulz et al., 1996)

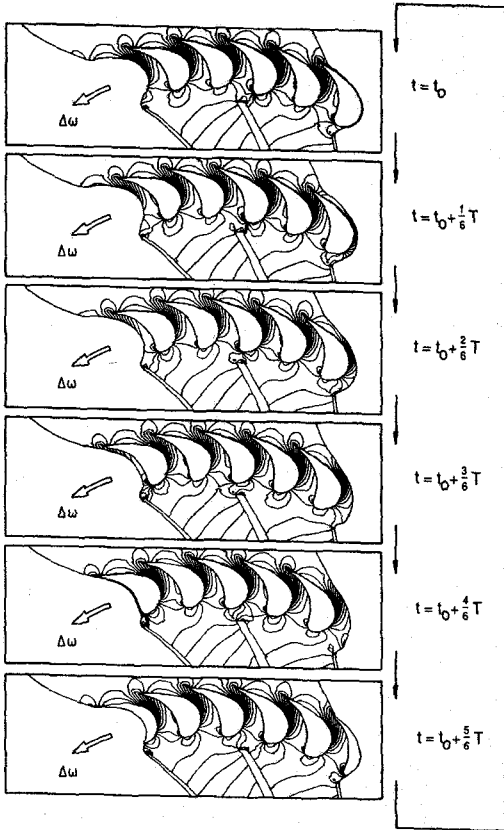
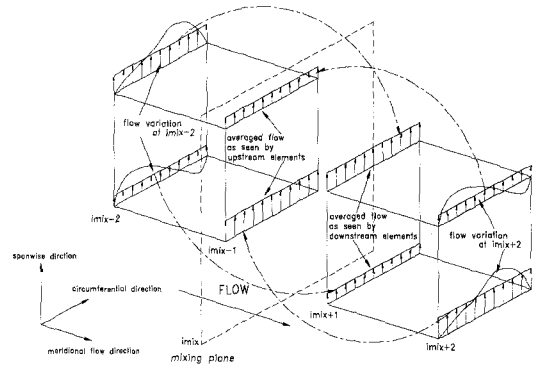


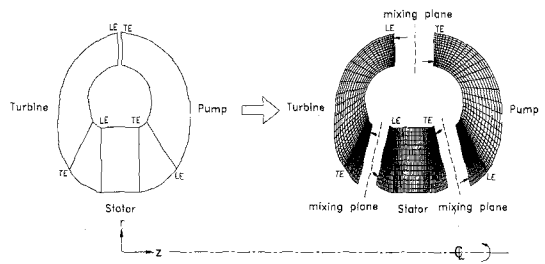
Fig. 16 Unsteady static pressure contours for pump and turbine (Schulz et al., 1996)

저자 등은 토크 컨버터의 유동장을 정상, 비압축성, 난류 유동이라는 가정아래 시간평균된 Navier-Stokes 방정식을 유한체적법을 이용하여 이산화하고 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에 의해 수치계산하였다. 저자 등의 계산방법은 이상에서 지적된 각 요소별 유동장의 출구에서의 경계위치와 경계조건의 적용상의 문제를 해소할 뿐만 아니라 또한 순환유량을 별도의 방법에 의해 구할 필요 없이 계산과정에서 구해질 수 있도록 Fig. 17에 도시된 바와 같이 인접 요소 사이에 혼합면을 설치하는 것이다. 혼합면은 두 인접 요소사이에서 정보를 교환하는 역할을 한다. 이러한 익렬간의 정보 교환은 전체 유로내의 상하류로 전파되어진다. 이 방법은 그림에서와 같이 토크 컨버터의

세 가지 요소 모두에 적용되었다. 그러므로 토크 컨버터의 전체 유로를 동시에 계산할 수 있고 해석시에 필요한 유일한 입력값은 펌프와 터빈의 회전수 뿐이다.



(a) concept of interrow mixing model



(b) application of interrow mixing model to torque converter flow field calculation

Fig. 17 Interrow mixing model

Fig. 18에 도시된 바와 같이 수치계산은 실속 속도비와 설계 속도비를 포함한 8개의 속도비에 대하여 수행되었으며, 수치계산결과에 의한 토크 컨버터의 성능이 실험치와 비교되고 있다. 저자 등의 수치계산결과는 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 과거의 수치해석결과에서도 본 연구결과와 같은 실험치와의 좋은 일치를 보이지 못하였다. 1차원 해석결과도 토크비 및 효율에 있어서 계산 결과 및 실험치와 잘 일치하고 있다. 그러나, 1차원 해석법에 의한 토크용량 C-factor의 예측결과

는 실험치와 상당한 차이를 보이고 있으며, 이는 1차원 해석법에 의한 토크용량을 예측함에 한계가 있음을 나타낸다. Bahr 등⁽⁸⁾은 스테이터에 작용하는 토크와 레이어 유속계를 이용하여 측정된 내부 순환유량을 1차원 해석법에 의한 결과와 비교하여 상당히 큰 차이가 있음을 밝힌 바 있다. 즉, 이 연구결과로부터 일차원 해석에는 여러 가지 단순화와 손실계수의 가정치가 포함되어 있기 때문에 순환유량을 옳게 평가하지 못한 결과 토크용량의 예측에서 큰 차이가 발생한 것으로 결론지을 수 있다. 따라서, 일차원 해석법에서 구한 순환유량을 입구조건으로 사용하여 수치계산한 Tasaka 등⁽²¹⁾의 수치계산 결과들은 만족스럽지 못하였다. 따라서, 익렬간 혼합모델을 이용한 저자 등의 토크 컨버터의 내부유동장의 수치계산은 과거의 계산법과는 달리 순환유량을 하나의 해로서 구할 수 있게 하며, 이를 합리적으로 평가함에 따라 토크 컨버터의 토크용량을 상당히 정확하게 예측된다고 할 수 있다.

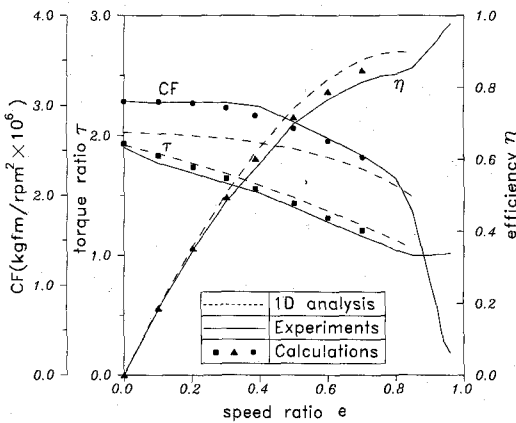


Fig. 18 Performance characteristics

또한, 저자 등은 다양한 실험적 연구(Bahr 등⁽⁸⁾, By,⁽¹⁰⁾ Gruver 등^(12,13)과 Brun 등^(14,15))가 수행된 동일한 토크 컨버터의 유동장을 대상으로 하여 익렬간 혼합모델을 이용한 수치계산을 수행하였으며, 실험결과와의 정량적인 비교분석을 통해

본 해석기법의 타당성을 검증하고 계산결과와 정확도를 평가하였다. Table 1에 제시된 바와 같이 저속도비인 $e=0.065$ 의 경우에 본 수치계산에 의해 예측된 순환유량 약 21.7 kg/s로써, Brun 등의 측정결과(21.7 kg/s)와 좋은 일치를 보인다. 그러나, 커플링점($e=0.820$)에 가까운 고속도비 $e=0.800$ 에서 예측된 순환유량은 약 16.2 kg/s로 실험결과(15 kg/s)에 비해 크게 평가되었다. 이는 커플링점에 가까운 저순환유량 유동영역인 고속도비 $e=0.800$ 의 경우에 각 요소 내부의 유동장의 복잡성으로 인해 본 연구에서 사용된 벽함수에 의한 표준 k-모델 등의 수치해석 기법상의 한계가 발생하였고, 익렬간 혼합모델에 의한 해의 수렴성 및 정확도가 떨어진 것이라고 생각된다.

Table 1 Measured and predicted circulating flow rates (measured : Brun et al., 1997)

	$e=0.065$	$e=0.800$
measured, (kg/s)	22	15
predicted, (kg/s)	21.7	16.2

또한, 저자 등의 수치계산방법에 의해 예측된 토크 컨버터의 펌프와 터빈 및 스테이터의 정압 분포는 세 가지 작동조건 모두에서 중간 스펙워치는 물론 비점성 유동계산방법으로는 해석하기 어려운 점성의 영향이 지배적인 코어와 셸 위치에서도 실험결과와 좋은 일치를 보였다. 또한, 펌프와 터빈 내에 발생하는 정압상승 및 정압강하 역시 해석 속도비별로 계산결과와 실험결과와는 좋은 일치를 보였다. Fig. 19와 20은 대표적인 결과로서, 설계 속도비 $e=0.6$ 에서 저자 등의 계산기법을 이용하여 구한 펌프와 터빈 내의 정압분포를 실험결과 및 비점성 계산결과와 비교한 것이다.

또한, 본 해설에는 소개되어 있지는 않지만, 펌프와 터빈 스테이터 내부의 속도장 역시 저자 등의 계산 방법에 의한 결과는 실험치와 좋은 일치를 보였다.

5. 토크 컨버터의 설계법

토크 컨버터의 수력학적 설계를 수행하기 위해서는 복잡한 3차원 유동을 적절히 모델링하여 성능과의 연관성을 고려하여야 한다. 본 해설의 전반부에 기술한 바와 같이 종래의 토크 컨버터의 설계에 관한 실용적인 방법으로서 일차원 설계법이 있다. 또한, 원형의 토러스 단면 형상을 갖는 토크 컨버터에 있어서는 Jandasek⁽⁷⁾에 의해서 설계법이 확립되어 상당히 높은 수준의 성능이 실현될수 있었다. 한편, 최근 일본의 경우 중소 배기량 차량에 있어서는 엔진을 횡치하는 전륜 구동 방식이 주류를 이루고 이에 따라 토크 컨버터의 축방향 길이가 단축되고 평편화와 경량화가 된 것이 차량에 장착되고 있다. 그러나, 기존의 경험에 기초한 설계법으로 평편형 토크 컨버터를 설계할 경우 효율이나 토크용량 등의 성능에 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 토크 컨버터의 축방향 길이가 감소됨에 따라 그 자오면 상에서 곡률 변화가 증대된 유로 내에서 각 요소에서 유입되는 유동의 불균일성이 증가하거나 부분적으로는 익부하가 과대하게 되어 유동 박리가 발생하고 유로 내에 국부적으로 유속이 증대하여 손실이 증가하기 때문인 것으로 알려져 있다.

자오면 형상이 평편화된 토크 컨버터를 적절하게 설계하기 위하여, 각 요소의 익면에서 바람직한 속도 및 압력 분포가 얻어질 수 있을 때까지 몇가지의 기하학적 인자를 조정하면서 익형상을 결정하는 과거의 직접 설계방법(Direct Design Method)을 대체하여 바람직한 익면 유속 및 압력 분포를 부여하고 이것을 실현할 수 있는 익형상을 해로서 구하는 역설계 방법(Indirect or Inverse Design Method)이 최근에 제안되었다.^(25,26)

Ejiri⁽²⁵⁾는 1990년에 토크 컨버터의 스테이터를 역설계하여 형상을 최적화하기 위한 연구결과를 발표하였다. Fig. 21은 스테이터의 평균 유동 익면에 대하여 설계된 기존의 익형과 이것을 기본으로 하여 날개의 압력면과 부압면에 속도분포를 가급적 평편하게 되도록 역설계 방법으로 설계된

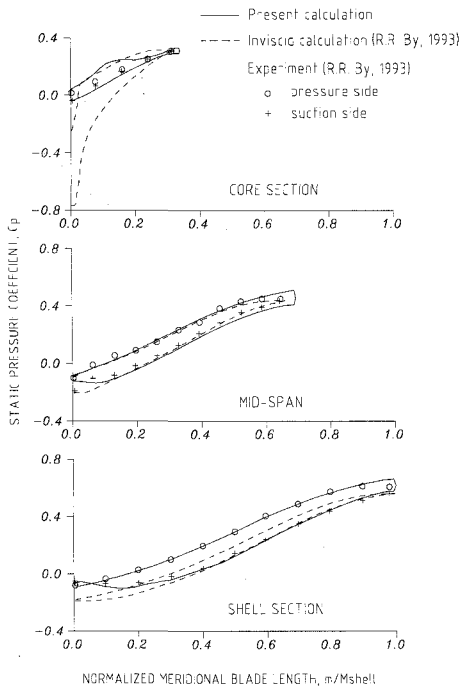


Fig. 19 Pump static pressure field under e=0.6

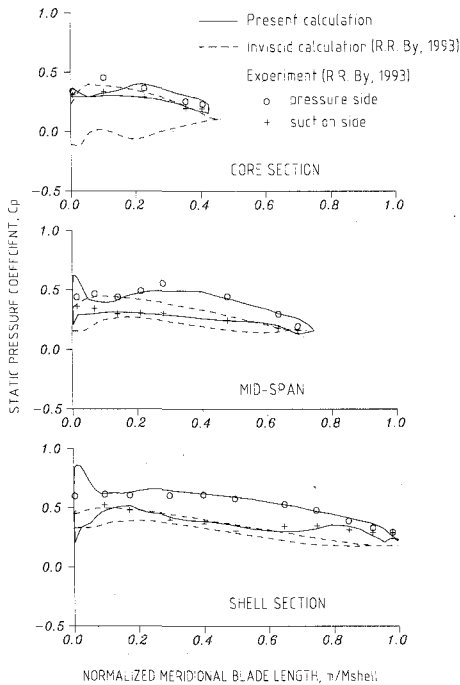
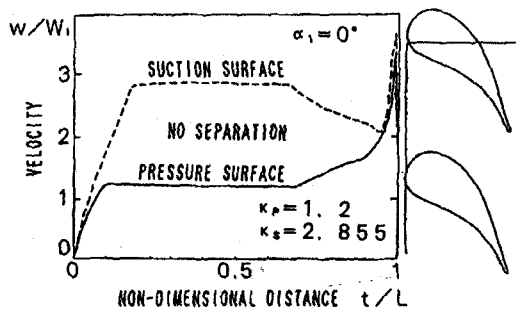
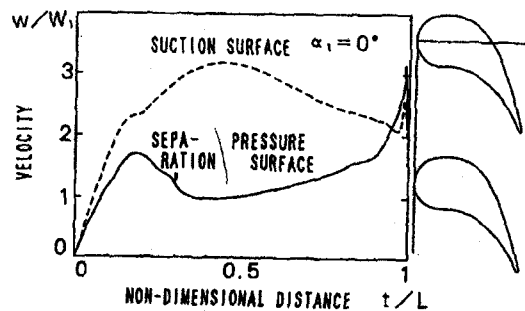


Fig. 20 Turbine static pressure field under e=0.6

익형상의 익면 속도분포를 나타낸 것이다. 이 설계법에 의하면 실속점($e=0.0$)의 성능을 희생함이 없이 최고 효율은 2% 내지 3% 정도, 고속도비의 토크 용량은 약 10% 향상시킬 수 있다는 것이 실험적으로 확인되었다.



(a) inverse design

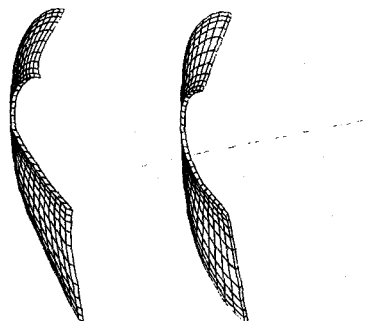


(b) direct design

Fig. 21 Surface velocity distribution and blade geometries (Ejiri, 1990)

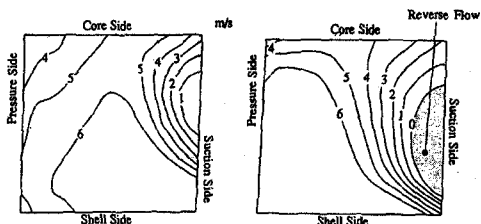
Zangeneh⁽²⁶⁾ 등은 펌프 임펠러의 경우 고속도비 영역의 효율을 향상시키기 위해서 부압면의 코어측 속도구배와 부압면상의 쉘상에서 코어쪽을 향하는 압력 구배의 조정을 수행한 3차원 역설계 방법을 적용하였다. Fig. 22에 제시된 바와 같이 기존의 펌프 임펠러가 쉘로부터 코어까지 선요소(line element)로 구성되어 있는 것에 비해 역설계 방법으로 설계된 날개의 형상은 고차항의 곡선으로 구성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 23은 기존 펌프 임펠러와 역설계된 펌프 임펠러를 동

일한 터빈과 스테이터에 조합한 후에 수치계산한 결과중에서 유로 중간 단면 내의 순환 유속 분포를 등고선으로 나타낸 것이다. 기존의 임펠러에서 발생하고 있었던 역류가 역설계 방법으로 설계된 회전차에서는 소멸하였으며, 손실은 약 15% 정도 감소하는 것으로 나타났다.



(a) Inverse design (b) Direct design

Fig. 22 Pump blade geometries

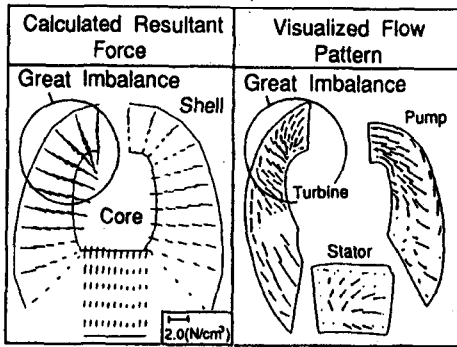
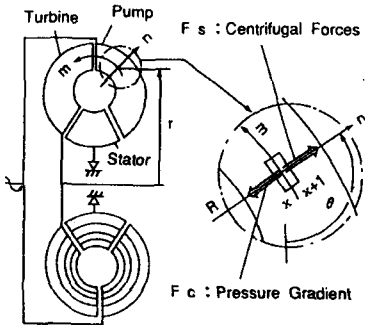


(a) Inverse design (b) Direct design

Fig. 23 Throughflow velocity distributions in mid-plane (Zangeneh et al., 1997)

토크 컨버터를 압력 균형 방법(pressure balance method)⁽²⁷⁾에 의해 설계함으로써 성능 개선이 가능했다는 보고가 있다. 이는 Fig. 24(a)에 제시된 바와 같이 토러스 단면상의 유선에 수직 방향으로 작용하는 원심력과 압력 구배의 크기가 균형을 이루게 하여 자오면상의 2차유동을 억제하는 방법이다. Fig. 24(b)는 원심력과 압력 구배의 불균형이 크면 익면상에서의 2차유동이 강해지는 것

을 나타내고 있다. 토러스 단면상의 평균 유선의 곡률 변화가 크거나 평편화가 심한 경우 압력 불균형이 크며, 터빈의 웰에서 코어까지의 날개각 분포나 오프셋각도 압력 구배에 상당한 영향을 미치며, 이러한 압력의 불균형이 토크 컨버터의 효율 저하와 연관성이 있음을 주장하였다.

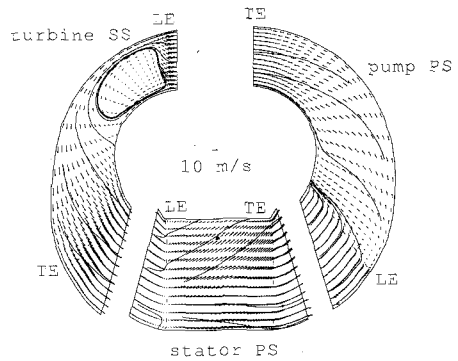


(b) Comparison between calculated pressure balance method and visualized flow pattern

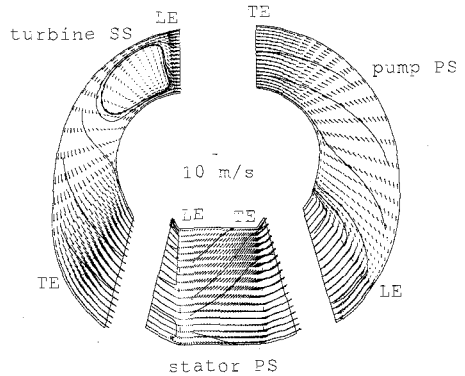
Fig. 24 Pressure balance method (Sakamoto et al., 1992)

저자 등⁽²⁸⁻³⁰⁾은 토크 컨버터의 여러 설계인자에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 먼저, 토크 컨버터의 각 요소의 날개각이 토크비와 토크 용량에 미치는 영향을 연구하였다.⁽²⁹⁾ 하나의 기준 토크 컨버터에서 펌프 날개의 출구각과 스테이터 날개의 입·출구각을 수정하여 이들에 대하여 수치해석하였다. 펌프 날개의 출구각을 토크 컨버터의 반회전방향으로 0° 에서 약 52.5° 정도로 급격히 수정하였을 때 실속 토크비의 변화량

은 약 5.2% 밖에 변화하지 않음에도 불구하고 실속 토크용량은 약 36.5% 정도로 상당히 크게 변화하였다. 따라서, 실속점에서의 토크용량의 조정은 펌프의 출구 날개각을 수정함으로써 효율적으로 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한, 수치해석 결과 펌프와 스테이터 날개의 출구각을 변경하여도 Fig. 25와 같이 자오면상의 속도장은 크게 변하지 않으며, 이러한 변경은 요소들의 익면 부하 특성을 국부적으로 달라지게 함으로써 토크비나 토크용량의 특성이 변화하는 것으로 생각된다.



(a) reference torque converter



(b) modified torque converter

Fig. 25 Relative vectors and streamlines

저자 등⁽³⁰⁾은 토크 컨버터의 설계과정 중에서 결정해야 할 몇 가지 기하학적 인자들이 토크 컨

버터의 내부 유동장과 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 토크 컨버터의 기하학적 형상이 성능과 내부 유동장에 밀접한 관계를 갖는다는 것이 수치계산에 의해 예측되었다. 특히, 기하학적 인자에 따라 토크용량은 상당히 크게 변하는 반면에, 토크비에 대한 영향은 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 그리고, 터빈의 오프셋각에 따른 유동접수면적의 증가는 마찰손실을 증가시키고, Fig. 26에 제시된 바와 같이 토크용량의 감소를 초래하였다. 그러므로, 터빈의 오프셋각은 유로의 접수면적을 최소화하는 각도에서 선정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

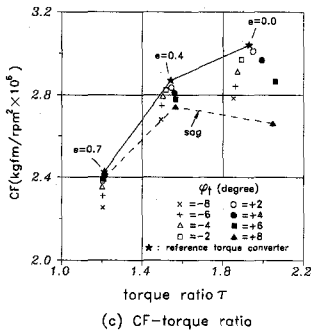
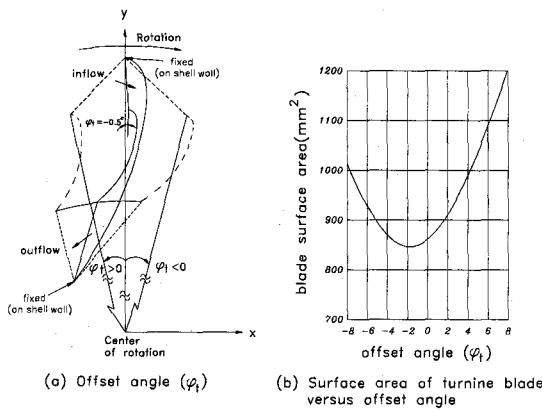


Fig. 26 Effect of offset angle of the turbine on the torque converter performance

또한, Fig. 27(a)와 같이 펌프 및 터빈의 자오면 형상을 바꾸면 전체 속도비 영역에서 토크용량 곡선의 기울기가 Fig. 27(b)와 같이 변하는 현

상이 나타났다. 즉, 자오면 형상에 대한 평편화가 과다할 경우 토크용량의 기울기가 감소하는 경향이 있음을 알 수 있었다.

이러한 토크 컨버터의 기하학적 형상 변화가 토크 컨버터의 성능 및 유동장에 미치는 영향에 관한 연구는 토크 컨버터의 설계 최적화에 필수적인 과정이므로, 실험에 의한 검증이 병행되어야 할 것이다.

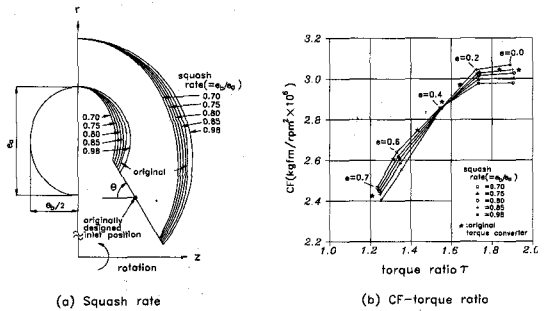


Fig. 27 Performance variation according to pump and turbine meridional configuration

후 기

본 해설은 국내 자동차업계는 물론 터보기계 제작사 및 연구단체가 토크 컨버터에 관심을 가져 주기를 바라면서 작성되었다. 해설용 투고로는 상당히 긴 내용이지만 여기에서 인용된 각종 실험적·수치계산적 기법은 토크 컨버터를 포함한 다양한 터보기계의 연구에 직접 적용될 수 있기 때문에 저자의 판단아래 유체기계공업학회의 유체기계저널에 소개하였다. 특히, 본 해설에 많은 참고자료를 제공해주신 (주)한국파워트레인에 감사드린다.

참고문헌

- (1) Ishihara, T., 1955, "A Study of Hydraulic

- Torque Converters," Rep. of the Institute of Industrial Science University of Tokyo, Vol.5, No.7, pp. 150-202.
- (2) Whitfield, A., Wallace, F., and Sivalingham, R., 1978, "A Performance Production Procedure for Three Element Torque Converters," Int. J. Mech. Sci., Vol. 20, pp.801-814.
- (3) Mercure, R.A., 1979, "Review of the Automotive Torque Converter," SAE Technical Paper #790046.
- (4) By, R.R., and Mahoney, J.E., 1988, "Technology Needs for the Automotive Torque Converter-Part 1 : Internal Flow, Blade Design, and Performance," SAE Technical Paper #880482.
- (5) Minato, K., Sakamoto, K., Takagi, M., and Fujitani, K., 1990, "A Performance Prediction of Hydrodynamic Torque Converter," SAE Technical Paper #900555.
- (6) Kubo, M., Ejiri, E., Okada, K., and Ishii, Y., 1991, "Improvement of Accuracy in Torque Converter Performance Prediction by Internal Flow Measurement," JSAE Academic Preprint #912279.
- (7) Jandasek, V.J., 1962, "The Design of a Single Stage Three-Element Torque Converter," SAE Design Practices-Passenger Car Automatic Transmission, Vol. 1.
- (8) Bahr, H.M., Flack, R.D., By, R.R., and Zhang, J.J., 1990, "Laser Velocimeter Measurements in the Stator of a Torque Converter," SAE Technical Paper #901769.
- (9) By, R.R. and Lakshiminayana, B., 1991, "Static Pressure Measurement in a Torque Converter Stator," SAE Paper #911934 and also in the 1992 SAE J. of Passenger C.
- (10) By, R.R., 1993, "An Investigation of Three-Dimensional Flow Fields in Automotive Torque Converter," Doctoral Dissertation, Department of Aerospace Engineering, The Pennsylvania State University, PSU-ARESP #93-022.
- (11) By, R.R. and Lakshiminayana, B., 1995, "Measurement and Analysis of Static Pressure Field in a Torque Converter Pump," J. of ASME Fluids Engineering, Vol. 117, pp.109-115.
- (12) Gruver, J.K., Flack, R.D., and Brun, K., 1996, "Laser Velocimeter Measurements in the Pump of an Automotive Torque Converter : Part I-Average Measurements," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 118, pp.562-569.
- (13) Gruver, J.K., Flack, R.D., and Brun, K., 1996, "Laser Velocimeter Measurements in the Pump of an Automotive Torque Converter : Part II-Unsteady Measurements," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 118, pp.570-577.
- (14) Brun, K and Flack, R.D., 1997, "Laser Velocimeter Measurements in the Turbine of an Automotive Torque Converter : Part I-Average Measurements," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 119, pp.646-654.
- (15) Brun, K and Flack, R.D., 1997, "Laser Velocimeter Measurements in the Turbine of an Automotive Torque Converter : Part II-Unsteady Measurements," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 119, pp.655-662.
- (16) Fujitani, K., Himeno, R., and Takagi, M., 1988, "Computational Study on Flow through a Torque Converter," SAE Technical Paper, #881746.
- (17) Abe, K., Kondoh, T, Fukumura, K, and Kojima, M., 1991, "Three-Dimensional

- Simulation of the Flow in a Torque Converter," SAE Technical Paper #910880.
- (18) Tsujita, H., Ejiri, E., and Mizuki, S., 1993, "Analysis of Flow within Pump Impeller of Torque Converter," 日本機械學會論文集 (B編) 59卷 564, pp.2500-2508.
- (19) By, R.R., Kunz, R., and Lakshiminarayana, B., 1995, "Navier-Stokes Analysis of the Pump Flow Field of an Automotive Torque Converter," ASME J. of Fluids Engineering, Vol. 117, pp.116-122.
- (20) Cigarini, M., and Jonnavithula S., 1995, "Fluid Flow in an Automotive Torque Converter : Comparison of Numerical Results with Measurements," SAE Technical Paper, #950673.
- (21) Tasaka, T., Kobayashi, T., Taniguchi, N. and Iketa, S., 1995, "Analysis of Viscous Flow in a Torque Converter," JSAE paper, #9534793.
- (22) Schulz, H., Greim, R., and Volgmann, W., 1996, "Calculation of Three Dimensional Viscous Flow in Hydrodynamic Torque Converters" ASME J. of Turbomachinery, Vol. 118, pp.578-589.
- (23) 박재인, 조강래, 1998, "익렬간 혼합모델을 이용한 토크 컨버터의 수치계산," 대한기계학회논문집 B권, 제22권 제3호, pp. 326-335.
- (24) Cho, K. R., 1997, "Boundary Conditions in Numerical Flow Analysis of Torque Converters and Turbomachines," JSME Centennial Grand Congress, ICFE-VI, Tokyo, Japan, July 13-17, pp. 45-51.
- (25) Ejiri, E. A., 1990, "A New Approach to Developing a More Efficient Torque Converter Stator," SAE Paper, 901765.
- (26) Zangeneh, M., Ejiri, E., and Kubo, M., 1997, "On 3D Inverse Design of an Automotive Torque Converter Pump Impeller in Shear Flow," Proceedings of JSME International Conference on Fluid Engineering, pp. 201-206.
- (27) Sakamoto, H., Suyama, K., and Saka, T., 1992, "Study on Torque Converter Circuit Profile," SAE Paper, 920765.
- (28) 김홍식, 박재인, 주원구, 조강래, 1997, "토크 컨버터의 설계와 성능해석," 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 502-508.
- (29) 박재인, 조강래, 1997, "토크 컨버터의 날개 각과 성능에 관한 수치해석적 연구," 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 656-663.
- (30) 박재인, 조강래, 1997, "토크 컨버터의 기하학적 형상에 따른 성능변화," 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 649-655.