

포텐셜 유동 해석을 이용한 토크 컨버터의 형상설계 파라미터들의 민감도 해석 (Sensitivity Analysis of Shape Design Parameters of a Torque Converter Using Potential Flow)

김 준양, 이 장무(서울대학교), 박 찬일(강릉대학교), 임 원식(기아자동차)
Joon-Yang Kim, Jang Moo Lee(Seoul National University)
Chan Il Park(Kangnung University), Won Sik Lim(KIA Motors)

ABSTRACT

In using a performance model of a torque converter determined by its geometric condition, it is possible that the analysis of two arbitrary converters produces the same results because of the same value of equivalent parameters despite their different shapes. Therefore, it is necessary to understand the effect of shape factor on dynamic performance, and equivalent parameters representing a performance model of a converter should be defined by the behavior of flow field. In this study, torus flow of a torque converter is changed into its equivalent system defined by the behavior of flow, and governing equations for the system are presented and used for analysis. Equivalent parameters are obtained from the results of flow analysis and are compared with parameters of one dimensional performance model. The influence that shape change of a converter has on the behavior of flow and the equivalent parameters is studied qualitatively.

1. 서론

초기 토크 컨버터에 대한 연구는 3차원 형상을 갖는 컨버터의 내부 유동장을 임의의 평균 유선상에서 등가로 표현하는 등 모델링에 의해 이루어졌다. Ishihara는 이러한 등가 모델링을 체계화하고, 그것을 이용하여 여러 가지 종류의 토크 컨버터에 대한 성능해석을 수행하였다. 그리고, 해석 결과를 실험결과와 비교함으로써 모델링의 타당성을 보였으며, 이러한 토크 컨버터의 성능해석 및 설계를 위한 유통 해석연구는 최근 컴퓨터 수치해석 분야의 발전에 힘입어 활발히 진행되고 있다. 이에 관련된 대표적인 연구로는 유한요소법에 의해 3차원 내부 유동장과 내부 유동순설의 물리적 해석을 수행하고 그 실험결과와 비교함으로써, 보다 정확한 성능모델 개발의 기법을 연구한 Robert R. By와 John E. Mahoney의 보고가 있다. 토크 컨버터의 내부 유동을 FEM 또는 FDM으로 해석하는 경향은 앞으로도 더욱 심화될 전망이고, 이 때의 수치해석 기법은 여러 형태를 통해 시도되고 있다.

기존의 토크 컨버터의 해석 및 설계에 이용되는 성능모델의 기본개념은 토크 컨버터의 내부 유동장이 임의의 평균 유선상에서 등가로 표현될 수 있다는 것이다. 이 때, 평균 유선의 위치는 임의의 단면에서 평균 반경으로 기술되고, 평균 유선은 단면에서의 유동장 거동과 무관하게 셀과 코어의 벽 면 및 단면과의 교점들에 의해서만 정의된다. 이러한 평균 유선의 성능모델을 이용할 때, 셀/코어의 형상이 서로 다름에도 불구하고 임의의 두 컨버터가 같은 동가 파라미터값들을 갖게 됨으로써 성능모델링의 해석결과가 동일하게 나타나는 문제점이 발생한다. 따라서 셀/코어 형상요소와 같은 상세한 설계인자가 동적 성능에 미칠 수 있는 영향도를 파악할 필요가 있으며, 이를 위해서 컨버터의 성능모델이, 내부 유동장의 거동에 의해 정의되는 동가 파라미터로 표현되어야 한다. 본 연구에서는 컨버터의 내부 유동장을 유동장의 거동에 의해 정의되는 동가 시스템으로 변환시키고, 이에 대한 운동방정식을 사용했다. 또한, 유동장의 거동에 의해 정의되는 동가 파라미터들의 몇 가지 결정방법을 계산, 비교했다. 평균 유선의 개념에 준거한 기존의 컨버터 성능모델에서는 간극 및 냉각유 순환에 대한 영향도를 무시하였다. 본 논문에서는 간극에서 정의된 각운동량 전달효율을 포함시켰다. 유동해석의 결과를 이용하여 동가 유선을 계산하고, 기존의 1차원 모델링에서 정의된 평균 유선들과 비교하였다. 컨버터의 셀/코어 형상변화가 내부 유동장의 거동에 미치는 영향을, 형상이 서로 다른 4가지의 컨버터들을 통해 고찰했다. 또한, 그에 따른 동가 파라미터값들의 변화양상을 정성적으로 고찰하였다.

2. 토크 컨버터의 모델링

2.1 검사체적의 설정 및 기본 운동방정식

토크 컨버터의 기본적인 동적 모델링에 대해 고려한다. 임펠러, 터빈, 리액터와 같은 토크 컨버터의 회전요소들은 Fig.1과 같은 구조를 갖는다. 내부의 유체는 운활과 냉각작용을 겸하기 때문에 외부로의 유통순환이 존재한다. 토크 컨버터 외부로 순환하는 유체는 각 회전요소의 간극(gap)을 통해 흐르며, 순환되는 유통량은 쉘과 코어로 유도되는 요소 내부의 유통량에 비해 매우 적은 편이다.

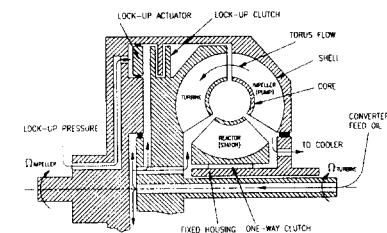


Fig.1 3-element lock-up torque converter and oil path

일반적으로 토크 컨버터의 내부 유체유동은, 회전요소의 내부를 흐르는 경우 유동에 대한 기술을 회전요소에 대해 상대적으로 나타내는 방법이 편리하며, 회전요소의 사이를 흐르는 경우에는 이웃한 두 회전장표계의 관계식에 중거하여 토크 컨버터를 장착한 대상의 좌표계에서 나타내는 것이 편리하다. 토크 컨버터의 해석을 위한 좌표계로서 지면에 고정된 Newtonian frame G 와, 차량과 같이 토크 컨버터가 장착된 어떤 대상에 고정된 좌표계 S , 그리고 토크 컨버터의 i 번째 회전요소에 고정된 좌표계 $E^{(i)}$ ($i = 1, 2, 3$)를 고려한다. 토크 컨버터가 장착된 어떤 대상에 고정된 좌표계 S 의 원점은 회전축 중심과 원형의 코어를 지나가는 임의의 반경방향의 직선과의 교점으로 정하며, i 번째 회전요소에 고정된 좌표계 $E^{(i)}$ 의 원점은 좌표계 S 의 원점과 동일하게 설정한다. 또한 좌표계 S 에 대한 i 번째 회전요소의 각속도를 Ω_i 라 한다. 토러스 유동량 Q 는 임펠러, 터빈, 리액터 등 회전요소 내부의 평균적인 3차원 유동을 원주방향의 단면인 토러스 단면에

투영한 것으로 그 흐름방향이 임펠러, 터빈, 리액터의 순서인 경우를 positive torus flow라고 하고 그 반대방향인 경우를 negative torus flow라고 한다. 본 연구에서는 positive torus flow인 경우를 양수의 Q 로 두고 모델링을 수행한다. 또한 회전요소의 첨자 i 는 임펠러를 $i=1$ 로 하여 positive torus flow 방향인 임펠러, 터빈, 리액터의 순으로 결정한다. 각 회전요소의 회전방향의 부호는 임펠러의 회전방향의 부호와 동일하게 정하며, 동력원에 의해 강제적으로 회전하는 임펠러의 회전방향을 양으로 한다.

일반적으로 토크 컨버터와 같은 동력유압 동력전달기구의 동역학적 모델링은 회전운동을 하는 요소 전체를 둘러싼 검사체적을 생각하여 검사체적 전체에 대한 역학적 원칙을 적용하고 회전요소 내부의 유동을 가정함으로써 근사화할 수 있다. 토크 컨버터해석을 위한 회전요소의 검사체적은 셀, 코어 및 깃 등의 강체 회전요소와 유동장을 포함한다고 생각한다. i 번째 회전요소의 검사체적을 $CV^{(i)}$ 로 표시한다. 또한 이웃하는 두 회전요소 사이에는 간극이 존재하는데, i 번째 회전요소와 j 번째 회전요소 사이의 간극과 셀 외부에 대한 검사체적을 각각 $CV_{gap}^{(i,j)}$, $CV_{shell}^{(i,j)}$ 로 표시하고 코어의 내부에 대한 검사체적을 $CV^{(core)}$ 로 표시한다. 토크 컨버터의 성능은 임펠러, 터빈, 리액터 등의 회전요소 내부의 토러스 유동량, Q 의 거동에 크게 영향 받으므로 이에 대한 모델링이 가장 중요하다. 임의의 회전요소에 대한 검사체적의 예로서 터빈의 검사체적이 Fig.2에 나타나 있다.

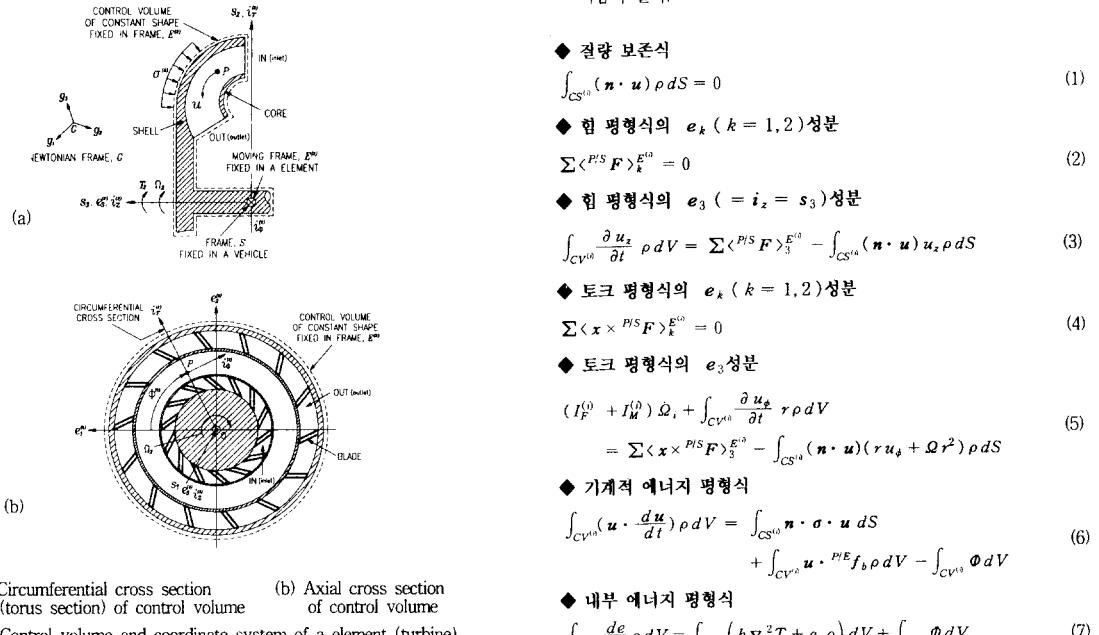


Fig.2 (b)는 검사체적의 회전축 방향의 단면을 표시한 것이며, Fig.2 (a)는 검사체적의 토리스 단면을 표시한 것으로서 Fig.2 (b)의 i , 축상의 단면을 뜻한다. Fig.2 (a)에서 회전 요소인 터빈에 부착된 운동 좌표계 $E^{(2)}$ 는 회전 축심에 원점을 두고 차량에 부착되어 있는 좌표계 S 에 대해 회전하며, Newtonian frame G 에 대한 좌표계 S 의 운동은 차량의 운동을 나타내며 좌표계 $E^{(2)}$ 는 회전요소 내부의 유동속도 u 를 기술하기 위한 운동 좌표계를 뜻한다. 또한 Fig.2 (b)에서 표시한 바와 같이 동심원의 회전요소에 대한 국부 좌표계로서 극좌표계를 고려한다.

검사체적에 작용하는 모든 외력은 유압과 유체 절성력과 같이 검사체적 표면에 작용하는 표면력과 유체질점에 작용하는 중력의 영향과 같은 채적력, 그리고 좌표계의 운동에 의한 관성력 등으로 생각할 수 있는데, 외부의 동력 전달장치로부터 전달되는 외부 토크도 표면력으로 고려될 수 있다. 이 때 임의의 회전요소의 외부 토크는 회전요소의 검사체적에 동력이 전달되

는 방향을 양수로 두고, 회전요소의 유동 입출구에 대한 표시는 positive torus flow를 기준으로 정하며 Fig.2과 같이 침자 $IN(inlet)$, $OUT(outlet)$ 으로 표시하기로 한다. 검사체적들에 적용되는 모델링은 다음과 같은 기본 가정하에서 이루어진다.

- (1) Newtonian frame G 에 대한 좌표계 S 의 운동은 좌표계 S 에 대한 i 번째 회전요소의 이동 좌표계 $E(i)$ 의 운동에 비해 미약하다고 생각하여 토크 컨버터 내부의 유동장에 미치는 좌표계 S 의 운동의 영향은 무시한다.
- (2) 임펠러, 터빈, 리액터 등의 회전요소들과 간극, 셀 외부 및 코어 내부에 대한 검사체적은 축대칭의 형상을 가지며 일정한 모양을 유지한다. 또한 회전요소의 내부 유동은 원주방향으로 동간격인 동일 형태의 것들에 의해 유도되고, 좌표계 S 의 운동에 의한 내부 유동장의 영향을 무시하므로, 임의의 이웃한 두 것에 의해 유도되는 유동장의 거동은 다른 것들에 의한 유동장의 거동과 동일하다고 생각할 수 있다.
- (3) 토크 컨버터의 작동유체는 비압축성으로 가정한다. Fig.2의 임의의 회전요소의 검사체적들에 대한 일반적인 압축성, 축대칭성 유동장의 기본 운동방정식들은 연속 방정식, 힘 평형식, 토크 평형식, 기계적 에너지 평형식과 내부 에너지 평형식으로 생각할 수 있다. 이를 운동방정식을 비압축성 유동장에 대해 극좌표계의 벡터성분으로 정리하면 다음과 같다.

◆ 질량 보존식

$$\int_{CS^{(i)}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) \rho dS = 0 \quad (1)$$

◆ 힘 평형식의 e_k ($k = 1, 2$) 성분

$$\sum \langle P^S F \rangle_k^{E^{(i)}} = 0 \quad (2)$$

◆ 힘 평형식의 e_3 ($= i_z = s_z$) 성분

$$\int_{CV^{(i)}} \frac{\partial u_z}{\partial t} \rho dV = \sum \langle P^S F \rangle_3^{E^{(i)}} - \int_{CS^{(i)}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) u_z \rho dS \quad (3)$$

◆ 토크 평형식의 e_k ($k = 1, 2$) 성분

$$\sum \langle \mathbf{x} \times P^S F \rangle_k^{E^{(i)}} = 0 \quad (4)$$

◆ 토크 평형식의 e_3 성분

$$(I_F^{(i)} + I_M^{(i)}) \dot{Q}_i + \int_{CV^{(i)}} \frac{\partial u_\phi}{\partial t} r \rho dV = \sum \langle \mathbf{x} \times P^S F \rangle_3^{E^{(i)}} - \int_{CS^{(i)}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})(r u_\phi + \dot{Q} r^2) \rho dS \quad (5)$$

◆ 기계적 에너지 평형식

$$\int_{CV^{(i)}} \left(\mathbf{u} \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right) \rho dV = \int_{CS^{(i)}} \mathbf{n} \cdot \sigma \cdot \mathbf{u} dS + \int_{CV^{(i)}} \mathbf{u} \cdot P^E f_b \rho dV - \int_{CV^{(i)}} \Phi dV \quad (6)$$

◆ 내부 에너지 평형식

$$\int_{CV^{(i)}} \frac{de}{dt} \rho dV = \int_{CV^{(i)}} \left(k \nabla^2 T + q, \rho \right) dV + \int_{CV^{(i)}} \Phi dV \quad (7)$$

이상의 식에서 침자 (i) 는 i 번째 회전요소를 뜻하며 $I_M^{(i)}$ 와 $I_F^{(i)}$ 는 각각 회전요소의 기계적 검사체적과 유동장 검사체적의 축 관성을 나타낸다.

2.2 검사체적에 대한 등가 운동방정식

(1) ~ (6)의 운동방정식은 3차원 유동을 표현하는 기본적인 식으로서 그 해를 구하기 위해서 복잡한 유동 해석을 필요로 한다. 토크 컨버터의 출력 성능을 전체 변속시스템과 결부하여 관찰하는 경우에는 유동장 해석내신 성능실험 결과에 바탕을 두는 등가의 동적 모델을 사용하는 것이 편리하다. 이러한 등가 모델은 유동장 내부의 평균적인 유체운동만을 고려한다는 의미를 갖는다. 등가 유선은 임의의 유동단면에서 특정점으로 나타나며 유동단면에서의 유동장의 성질은 이러한 특정점에서 등가로 기술된다. 따라서, 등가 운동방정식을 구하기 위하여 유동단면의 선정 및 유동장 변수들의 등가화에 대해 고찰한다. 이를 위하여 Fig.3을 고려한다.

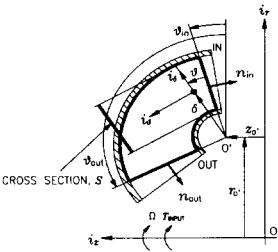


Fig.3 Coordinate system of a rotating element

Fig.3은 Fig.2로 표현되는 검사체적 내부의 유동장에 대한 좌표계 $\delta - \theta$ 를 나타내고 있다. 회전요소의 검사체적은 Fig.3과 같이 3차원 유도것이 존재하는 영역과 유도것이 존재하지 않는 영역으로 나눌 수 있는데, 본 절에서의 회전요소 유동장의 근사화는 3차원 유도것이 존재하는 영역으로 국한한다. 또한 식의 표현상의 편의를 위하여 회전요소에 대한 참자는 생략한다. Fig.3에서 θ 는 positive torus flow의 방향을 양의 값으로 정의하며, 좌표계의 원점 O 는 3차원 유도것이 존재하는 영역에서 positive torus flow의 방향에 의해 정의되는 입구(첨자 in)와 출구(첨자 out) 단면의 연장선의 교점으로 정의한다. 이상의 좌표계를 이용하여 유량 및 평균 유속 등의 등가 변수들을 다음과 같이 정의한다.

(1) Fig.3은 검사표면의 법선벡터 n 와 유속 u 를 쉽게 기술하기 위한 좌표계를 나타내고 있다.

$$\begin{cases} i_\theta \\ i_\phi \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{cases} i_r \\ i_z \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_r \\ i_z \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{cases} i_\theta \\ i_\phi \end{cases} \quad (8)$$

이 때 Fig.3에서 θ 로 결정되는 임의의 유동단면 S 는 검사표면의 의미를 갖지 않으므로 그 법선 벡터를 i_θ 와 동일하다고 생각한다. 이에 반해 검사표면의 법선벡터는 검사체적의 의미를 가지므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_{out} = i_{\theta_{out}}, \quad n_{in} = -i_{\theta_{in}} \quad (9)$$

유동속도 u 를 $\delta - \theta$ 좌표계로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u &= u_r i_r + u_z i_z + u_\phi i_\phi \\ &= u_z i_\theta + u_\theta i_\theta + u_\phi i_\phi \end{aligned} \quad (10)$$

(8)의 좌표 변환에 의한 속도 성분의 변화는 다음과 같다.

$$\begin{cases} u_\theta \\ u_\phi \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{cases} u_r \\ u_z \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_r \\ u_z \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{cases} u_\theta \\ u_\phi \end{cases} \quad (11)$$

(2) 부검사체적 내의 임의의 단면을 통과하는 유량 Q_k 를 다음과 같이 정의한다.

$$Q_k = \int_{S_k} (i_\theta \cdot u) dS = \int_{S_k} u_\theta dS \quad (12)$$

여기서 첨자 S_k 는 k 번의 부검사체적내의 임의의 유동단면을 뜻한다.

$$Q_k = \int_{CS(\theta_{in})} (n \cdot u) dS = - \int_{CS(\theta_{out})} (n \cdot u) dS = \int_{S_k} u_\theta dS \quad (13)$$

(3) (12)의 유량의 정의를 이용하여 평균 유속을 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{u}_\theta(\theta, t) = u_\theta - \bar{u}_\theta, \quad \int_{S_k} \bar{u}_\theta dS = 0 \quad (14)$$

$$\bar{u}_\theta(\theta, t) = u_\theta - \bar{u}_\theta, \quad \int_{S_k} \bar{u}_\theta dS = 0 \quad (15)$$

$$\bar{u}_\phi(\theta, t) = u_\phi - \bar{u}_\phi, \quad \int_{S_k} \bar{u}_\phi dS = 0 \quad (16)$$

$$Q_k = \int_{S_k} u_\theta dS = \bar{u}_\theta A_{k,F}, \quad (A_{k,F} = \int_{S_k} dS) \quad (17)$$

여기서 $A_{k,F}$ 는 k 번째 부검사체적의 유로 단면적을 나타내며 강체부분에 해당하는 단면적과는 다음의 관계로 표시한다.

$$\sum_{k=1}^N (A_{k,F} + A_{k,M}) = A_F + A_M = A \quad (18)$$

(4) (3)에서 정의한 평균 유속 $\bar{u}_\theta, \bar{u}_\phi, \bar{u}_\phi$ 는 3차원 유동장의 spatial coordinate의 합수가 아니며 임의의 단면의 위치를 나타내는 θ 와 시간 t 만의 함수라고 생각할 수 있다.

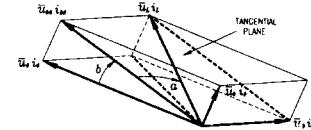


Fig.4 Schematic diagram of mean flow vector

여기서 등가 각도 a, b 는 θ 와 시간 t 에 대한 함수로 생각한다.

$$a = a(\theta, t), b = b(\theta, t) \quad (19)$$

등가 각도를 이용하여 (17)의 유량 Q_k 를 표현하면 다음과 같다.

$$Q_k = \bar{u}_\theta A_{k,F} = \bar{u}_\theta \left(\frac{A_{k,F}}{\tan b} \right) = \bar{u}_\theta \left(\frac{A_{k,F} \cos b}{\tan a} \right) \quad (20)$$

또한 유량의 시간 변화율 \dot{Q}_k 는 다음과 같이 정리된다.

(5) 임의의 단면에서의 토크 유동체적에 대한 기하학적 등가 반경 \bar{r}_G

$$\begin{cases} \bar{r}_G = \frac{1}{A_F} \int_S \delta dS, & \bar{r}_G = \frac{1}{A_F} \int_S r dS \\ \bar{r}_G = \frac{2(r_i^2 + r_i r_c + r_c^2)}{3(r_i + r_c)} \end{cases} \quad (21)$$

(6) 임의의 유동 단면적을 이등분하는 점의 축반경 \bar{r}_M 의 정의

$$(\bar{r}_M)^2 = \frac{1}{A_F} \int_S r^2 dS = \frac{r_i^2 + r_c^2}{2} \quad (22)$$

(7) (5)로 주어지는 토크 평형식을 근사화하기 위하여 임의의 단면 S 에서의 속도분포에 관계하는 실험 계수들을 다음과 같이 정의한다.

$$C_\theta^2 \equiv \frac{1}{A_F} \int_S \left(\frac{u_\theta}{u_\theta} \right) \left(\frac{r}{r_M} \right)^2 dS \quad (23)$$

$$C_\theta^2 \equiv \frac{1}{A_F} \int_S \left(\frac{u_\theta}{u_\theta} \right) \left(\frac{u_\phi}{u_\phi} \right) \left(\frac{r}{r_M} \right) dS \quad (24)$$

$$C_\phi^2 \equiv \frac{1}{A_F} \int_S \left(\frac{u_\phi}{u_\phi} \right) \left(\frac{r}{r_M} \right) \left(\frac{\delta}{\delta_M} \right) dS \quad (25)$$

흐름반경 및 흐름방향은 실제 유동과는 큰 차이가 있으므로, 대개의 경우 유동단면에서의 캐리어 속도분포에 관계되는 실험 계수를 사용한다. 본 연구에서는 이 실험 계수를 이용하여 다음과 같은 등가 반경, 등가 단면적, 등각 각도 등을 정의한다.

$$R = \bar{r}_M \sqrt{C_\theta^2}, \quad \bar{A} = A_F \cos b, \quad x = \left(\frac{C_\phi^2}{C_\theta^2} \right) \tan a \quad (26)$$

이상의 고찰을 통하여 토크 평형식 (5)의 정상상태함을 근사화하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \int_{CS} (n \cdot u) (r u_\phi + Q r^2) \rho dS &= \rho Q \Omega \left((R^2)_{out} - (R^2)_{in} \right) \\ &+ \rho Q^2 \left\{ \left(\frac{x R}{\bar{A}} \right)_{out} - \left(\frac{x R}{\bar{A}} \right)_{in} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

컨버터 내부 형상에 의한 관성효과를 뜻하는 다음의 계수를 정의한다.

$$I_G = \rho \int_{S_k}^{S_\theta} C_\phi^2 \frac{\tan a}{\cos b} \bar{r}_M \delta_M d\theta \quad (28)$$

이 때 토크 평형식의 과도상태함은 다음과 같이 정리된다.

$$\int_{CV} \frac{\partial u_\phi}{\partial t} r \rho dV = I_G Q + Q \frac{\partial}{\partial t} (I_G) \quad (29)$$

다음으로 토크 평형식의 외력항을 외부 토크와 점성 토크로 나누어 각각 T_{ext} , T_ζ 를 표시한다. 또한 체적력 및 관성력에 의한 토크의 축방향 성분을 $^{P/S}T_b$ 라 표시한다.

$$\Sigma \langle \mathbf{x} \times {}^{P/S}\mathbf{F} \rangle_3 = {}^{P/S}T_b + T_{ext} + T_\zeta \quad (30)$$

결과적으로 토크 평형식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I\ddot{Q} + I_G\dot{Q} + Q\frac{\partial}{\partial t}(I_G) &= \rho Q\mathcal{Q}\left((R^2)_m - (R^2)_{out}\right) \\ &\quad + \rho Q^2\left(\left(\frac{xR}{A}\right)_m - \left(\frac{xR}{A}\right)_{out}\right) \\ &\quad + {}^{P/S}T_b + T_{ext} + T_\zeta \end{aligned} \quad (31)$$

여기서 $I = I_F + I_M$ 을 뜻한다.

i 번째 회전요소 내부의 토크스 유동 Q 를, 동력원에 연결되는 회전요소의 토크스 유량 Q_i 를 기준으로 하여 다음의 유량비 $\eta_{Q,i}$ 를 정의한다.

$$Q_i = \eta_{Q,i} \cdot Q_1, \quad \eta_{Q,i} > 0, \quad \eta_{Q,1} = 1 \quad (32)$$

모든 회전요소 내부의 유량의 부호는 i 번째 회전요소 내부의 유량의 부호와 동일하게 표시된다.

$$sign(Q_i) = sign(Q_1), \quad (i=1 \sim N_e) \quad (33)$$

앞서 고찰한 회전요소의 검사체적은 3차원 유도깃이 존재하는 영역(첨자 $in' \sim 첨자 out'$ 의 영역, $CV^{in'}$)을 뜻한다. 이러한 3차원 유도깃이 존재하는 i 번째 회전요소의 유동 입출구에서의 단위질량당 각운동량을 $h_i^{in'}$, $h_i^{out'}$ 으로 표시하기로 한다. 이때 단위질량당의 각운동량은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} h_i^{in'} &= R_i^{in'} \left\{ Q_i R_i^{in'} + Q_i \left(\frac{x}{A} \right)^{in'} \right\}, \\ h_i^{out'} &= R_i^{out'} \left\{ Q_i R_i^{out'} + Q_i \left(\frac{x}{A} \right)^{out'} \right\} \end{aligned} \quad (34)$$

인접한 두 회전요소의 간극에서 각운동량 전달효율을 다음과 같이 정의한다.

$$h_{k,i} = \begin{cases} \frac{\rho Q_i h_i^{in'} + T_{k,i}}{\rho Q_{i-1} h_{i-1}^{out'}} & (sign(Q_1) > 0) \\ -\frac{\rho Q_i h_i^{out'} + T_{k,i}}{-\rho Q_{i+1} h_{i+1}^{in'}} & (sign(Q_1) < 0) \end{cases} \quad (i = 1 \sim N_e) \quad (35)$$

(35)의 각운동량 전달효율계수와 (32) ~ (34)의 표시법을 이용하여 각운동량 방정식을 i 번째 회전요소에 대해 정리하면 다음과 같다.

◆ 각운동량 보존식, positive flow일 때 ($Q_1 > 0$)

$$\begin{aligned} I_i \ddot{Q}_i + \eta_{Q,i} I_{G,i} Q_1 + \frac{\partial}{\partial t}(\eta_{Q,i} I_{G,i}) Q_1 \\ = \rho Q_1 (\eta_{Q,i-1} h_{i-1}^{out'} - \eta_{Q,i} h_i^{out'}) + {}^{P/S}T_{b,i} + T_{ext,i} - T_{loss,i} \end{aligned} \quad (36)$$

◆ 각운동량 보존식, negative flow일 때 ($Q_1 < 0$)

$$\begin{aligned} I_i \ddot{Q}_i + \eta_{Q,i} I_{G,i} Q_1 + \frac{\partial}{\partial t}(\eta_{Q,i} I_{G,i}) Q_1 \\ = \rho Q_1 (\eta_{Q,i} h_i^{in'} - \eta_{Q,i+1} h_{i+1}^{in'}) + {}^{P/S}T_{b,i} + T_{ext,i} - T_{loss,i} \end{aligned} \quad (37)$$

토크 컨버터전체에 대한 기계적 에너지 평형식은 컨버터 전체를 검사체적으로 고려하여 (6)을 적용한다. 기계적 에너지는 스칼라이므로 기준 좌표계에 관계없이 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$\frac{dE_{mech}}{dt} = P_{surface} + P_{body} - P_{loss} \quad (38)$$

(6)의 기계적 에너지식은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \int_{CV^{in'}} (\mathbf{u} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}) \rho dV &= \int_{CV^{in'}} \mathbf{n} \cdot \sigma \cdot \mathbf{u} dS + \int_{CV^{in'}} \mathbf{u} \cdot {}^{P/E}f_b \rho dV \\ &\quad - \frac{1}{2} \int_{CV^{in'}} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u})(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) \rho dS - \int_{CV^{in'}} \phi dV \end{aligned} \quad (39)$$

다시 (39)의 기계적 에너지식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{Q,i} \ddot{Q}_i + \frac{Q_1}{2 \eta_{Q,i}} \frac{\partial(\eta_{Q,i} I_{G,i})}{\partial t} + I_{G,i} \dot{Q}_i \\ = -sign(Q_1) p_{loss,i} + \bar{p}_i^{in'} - \bar{p}_i^{out'} + \frac{\rho Q_i^2}{2} \left(\frac{C_{L,i}^{in'}}{(\bar{A}_i^{in'})^2} - \frac{C_{L,i}^{out'}}{(\bar{A}_i^{out'})^2} \right) \\ - \frac{\rho Q_i^2}{2} \left((R_i^{in'})^2 - (R_i^{out'})^2 \right) + \int_{CV^{in'}} \left(\frac{\mathbf{u}}{Q_1} \right) \cdot {}^{P/S}f_b \rho dV \end{aligned} \quad (40)$$

이상의 정의를 이용하여 토크 컨버터의 운동방정식을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

◆ 행렬형태로 표현된 토크 컨버터의 일반적인 지배방정식 ($Q_1 > 0$)

$$\begin{array}{|c c c c|} \hline I_1 & 0 & 0 & I_{G,1} \\ \hline 0 & I_2 & 0 & \eta_{Q,2} I_{G,2} \\ 0 & 0 & I_3 & \eta_{Q,3} I_{G,3} \\ \hline I_{G,1} & \eta_{Q,2} I_{G,2} & \eta_{Q,3} I_{G,3} & I_{Q,u} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \dot{Q}_1 \\ \hline \dot{Q}_2 \\ \hline \dot{Q}_3 \\ \hline \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \dot{Q}_1 \\ \hline \dot{Q}_2 \\ \hline \dot{Q}_3 \\ \hline \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \dot{Q}_1 \\ \hline \dot{Q}_2 \\ \hline \dot{Q}_3 \\ \hline \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline T_k \tau_{\alpha,1} \\ \hline T_k \tau_{\alpha,2} \\ \hline T_k \tau_{\alpha,3} \\ \hline \sum_{i=1}^3 \eta_{Q,i} (p_{in,i}^i - p_{out,i}^i) \\ \hline \end{array} \quad (41)$$

$$+ \begin{array}{|c|} \hline T_k \tau_1 \\ \hline T_k \tau_2 \\ \hline T_k \tau_3 \\ \hline \frac{P_{out} - P_{loss}}{Q_1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline {}^{P/S}T_{b,1} \\ \hline {}^{P/S}T_{b,2} \\ \hline {}^{P/S}T_{b,3} \\ \hline - \frac{{}^{P/S}P_b}{Q_1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \frac{\partial}{\partial t} (I_{G,1}) Q_1 \\ \hline \frac{\partial}{\partial t} (\eta_{Q,2} I_{G,2}) Q_1 \\ \hline \frac{\partial}{\partial t} (\eta_{Q,3} I_{G,3}) Q_1 \\ \hline \frac{\partial}{\partial t} (I_{Q,u}) \frac{Q_1}{2} + \frac{1}{Q_1} \int_{CV^{in'}} \mathbf{v} \cdot \frac{s}{\partial t} \rho dV \\ \hline \end{array}$$

◆ 행렬형태로 표현된 토크 컨버터의 일반적인 지배방정식 ($Q_1 < 0$)

$$\begin{array}{|c c c c|} \hline I_1 & 0 & 0 & I_{G,1} \\ \hline 0 & I_2 & 0 & \eta_{Q,2} I_{G,2} \\ 0 & 0 & I_3 & \eta_{Q,3} I_{G,3} \\ \hline I_{G,1} & \eta_{Q,2} I_{G,2} & \eta_{Q,3} I_{G,3} & I_{Q,u} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \dot{Q}_1 \\ \hline \dot{Q}_2 \\ \hline \dot{Q}_3 \\ \hline \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \dot{Q}_1 \\ \hline \dot{Q}_2 \\ \hline \dot{Q}_3 \\ \hline \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \dot{Q}_1 \\ \hline \dot{Q}_2 \\ \hline \dot{Q}_3 \\ \hline \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline T_k \tau_{\alpha,1} \\ \hline T_k \tau_{\alpha,2} \\ \hline T_k \tau_{\alpha,3} \\ \hline \sum_{i=1}^3 \eta_{Q,i} (-p_{in,i}^i + p_{out,i}^i) \\ \hline \end{array} \quad (42)$$

$$+ \begin{array}{|c|} \hline T_k \tau_1 \\ \hline T_k \tau_2 \\ \hline T_k \tau_3 \\ \hline \frac{P_{out} - P_{loss}}{Q_1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline {}^{P/S}T_{b,1} \\ \hline {}^{P/S}T_{b,2} \\ \hline {}^{P/S}T_{b,3} \\ \hline - \frac{{}^{P/S}P_b}{Q_1} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \frac{\partial}{\partial t} (I_{G,1}) Q_1 \\ \hline \frac{\partial}{\partial t} (\eta_{Q,2} I_{G,2}) Q_1 \\ \hline \frac{\partial}{\partial t} (\eta_{Q,3} I_{G,3}) Q_1 \\ \hline \frac{\partial}{\partial t} (I_{Q,u}) \frac{Q_1}{2} + \frac{1}{Q_1} \int_{CV^{in'}} \mathbf{v} \cdot \frac{s}{\partial t} \rho dV \\ \hline \end{array}$$

3. 토크 컨버터의 유동 해석과 등가 유선의 계산 및 고찰

3.1 포텐셜 유동 해석을 이용한 등가 유선의 결정

본 논문에서 정의하는 등가유선을 결정하기 위해서는 컨버터의 기하학적 형상인자외에 임의의 단면에서의 속도 분포에 대한 정보를 필요로 한다. 따라서 본 절에서는 등가 유선을 결정하기 위해, 컨버터 내부의 유동장을 포텐셜 유동장으로 고려하여 임의의 회전요소 입출구단면에서의 속도분포를 구한다. 포텐셜 유동장의 지배방정식은 연속방정식의 형태를 취하며, 컨버터 내부 유동장을 등가의 2차원 유동장으로 근사화시킨 유선함수(stream function)를 이용하였다. 토크 컨버터의 임의의 회전요소 내부의 기본적인 연속방정식을 극좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} (u_\phi) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \quad (43)$$

여기서 u_ϕ 는 회전 접선방향의 속도 성분으로서, r 과 z 가 고정된 점에서 회전 접선방향으로의 변화를 무시하기로 한다. 이때 위의 연속방정식은 다음과 같은 2차원 유동의 연속방정식으로 표현될 수 있다.

$$v_\phi|_{r,z} = const \quad (44)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} \cong \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \quad (45)$$

위 식을 토크스 단면에서의 2차원 등가 유동으로 근사화하기 위하여 양변에 r 을 곱하여 정리하면, 다음과 같이 r 과 z 를 직각 좌표계의 각 좌표값으로 하는 등가의 2차원 연속방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} \cong \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} = \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (46)$$

$$U = U_r i_r + U_z i_z, \quad U_r = r u_r, \quad U_z = r u_z \quad (47)$$

즉, $r-z$ 평면에서의 등가의 2차원 포텐셜 유동에 대한 지배방정식은 (47)에서 정의한 U 에 대한 연속방정식으로 고려될 수 있다. 만일 (43)의 기본적인 연속방정식에서 회전 접선방향의 변화율을 고려한다면 (43) 우변의 둘째 항은 $r-z$ 평면의 각 위치에 가해지는 외부 조건이라 생각할 수 있다. 이런 경우, (47)의 정의를 이용하여 2차원 등가 유동장의 연속방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot U = g_s(r, z), \quad g_s(r, z) = -\frac{\partial}{\partial \phi} (u_\phi) \quad (48)$$

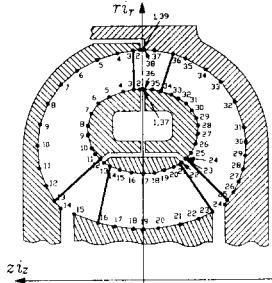


Fig.5 Contour data points of a torque converter equipped on heavy duty vehicle

해석시 데이터는 Fig.5의 중부하 차량용 토크 컨버터의 셀/코어 윤곽선 데이터를 사용하였고, 해석을 위해서는 유동 해석용 프로그램 FLUENT를 이용하였다.

1) PREBFC에서의 작업

- (1) 토크 컨버터의 셀/코어 데이터 입력
- (2) 입력레이터를 기초로 곡선과 표면 생성
- (3) 확정된 토크 컨버터의 도메인 내부에 격자 생성

2) FLUENT에서의 작업

- (1) 경계조건의 설정
- (2) 필요한 물리 상수의 입력
 - 유체의 밀도 : 849.0 kg/m^3
 - 유체의 점도 : $0.0 \text{ kg/(m \cdot sec)}$
 - 작동압력 : $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
- (3) 초기조건의 부여
- (4) 수렴기준의 설정
- (5) 계산의 수행

Fig.6, Fig.7는 (46)에서 근사화한 등가의 2차원 포텐셜 유동을 해석하여 얻은 컨버터 내부 유동장의 유선과 압력 및 속도분포를 나타내고 있다.

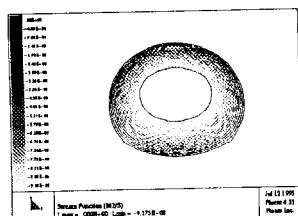


Fig.6 Stream lines in torque converter (2D potential flux)

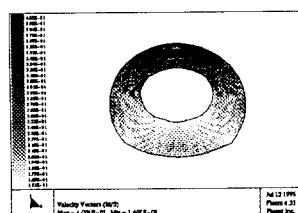


Fig.7 Velocity vector in torque converter (2D potential flux)

이상의 포텐셜 유동 해석의 결과로부터 기하학적 반경 \bar{r}_G 및 평균 반경 \bar{r}_M , 등가 반경 R 을 계산하였으며, 그 비교결과를 Fig.8에 나타냈다. Fig.8에서 가로축의 회전각은 Fig.5의 좌표계에서 반시계 방향의 회전각 θ_d 를 의미한다. 결과로부터 보여지듯이, 기하학적 반경과 평균 반경 사이에는 큰 차이가 발생하지 않으나, 등가 반경과 다른 두 반경과의 차이는 헬, 코어의 반경이 최대 또는 최소인 지점, 즉 $\theta_d = 0^\circ$, $\theta_d = 180^\circ$ 에서 크게 나타나며, $\theta_d = 90^\circ$ 인 지점에서는 이 세 종류의 반경들이 일치함을 알 수 있다.

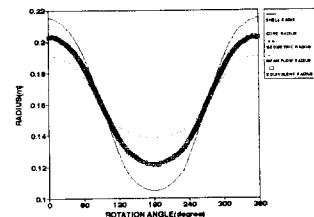


Fig.8 Comparison of geometric radius \bar{r}_G , mean flow radius \bar{r}_M and equivalent radius R

Fig.9은 기하학적 단면적 A_F 와 등가 단면적 \bar{A} 의 비교 결과를 나타낸 것이다. 결과로부터 보여지듯이, 등가 단면적 \bar{A} 은 모든 영역에서 기하학적 단면적 A_F 보다 작게 결정되며, 헬/코어의 반경이 최대 및 최소인 지점, 즉 $\theta_d = 0^\circ$, $\theta_d = 180^\circ$ 에서는 두 단면적이 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 등가 단면적과 기하학적 단면적의 두 일치점은 다음 절에서 수행된 여러 청상별 연구를 통해서도 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 회전 접선방향의 유속은 고려되지 않으므로 (26)로 정의되는 등가 각도 x 는 결정할 수 없다.

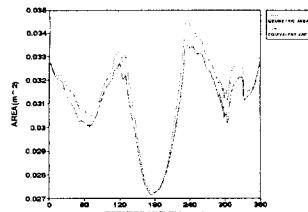


Fig.9 Comparison of geometric area A_F and equivalent area \bar{A}

3.2 토크 컨버터의 형상에 따른 등가 유선의 변화

앞에서 해석시 대입한 Fig.5의 중부하 차량용 토크 컨버터의 셀, 코어 형상데이터를 일정한 비율로 변화시켜면서 그에 따른 유동장의 거동변화와 등가 반경 및 등가 단면적의 정성적 변화를 고찰하였다.

● CASE 1 : $1.3 \times z_{mid}$, $0.7 \times r_{mid}$

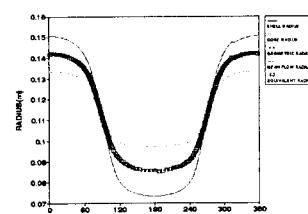


Fig.10 Comparison of geometric radius \bar{r}_G , mean flow radius \bar{r}_M and equivalent radius R

● CASE 2 : $1.0 \times z_{init}$, $0.7 \times r_{init}$

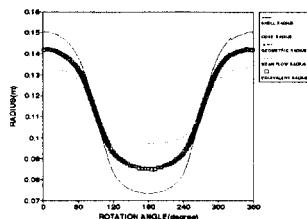


Fig.11 Comparison of geometric radius \bar{r}_G , mean flow radius \bar{r}_M and equivalent radius R

● CASE 3 : $1.0 \times z_{init}$, $1.3 \times r_{init}$

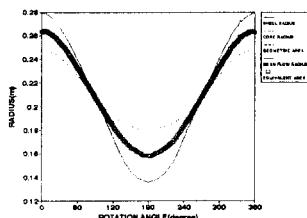


Fig.12 Comparison of geometric radius \bar{r}_G , mean flow radius \bar{r}_M and equivalent radius R

● CASE 4 : $0.7 \times z_{init}$, $1.3 \times r_{init}$

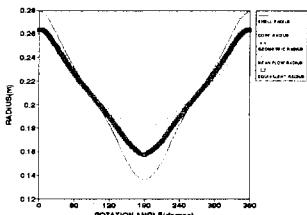


Fig.13 Comparison of geometric radius \bar{r}_G , mean flow radius \bar{r}_M and equivalent radius R

동가 반경의 경우, 기하학적 반경 및 평균 반경과 큰 차이가 나타내는 지점이 높이 대 폭비가 커질수록 $\theta_d = 0^\circ$ 와 $\theta_d = 180^\circ$ 의 근처로 집중되는 경향을 보이면서 나머지 영역에서는 3종류의 반경이 거의 일치하고 있다. 한편, 반대로 높이 대 폭비가 작아질수록 반경값들의 차이는 컨버터의 회전각도상에서 골고구 존재한다.

동가 단면적의 경우는, 모든 경우에 기하학적 단면적과의 차이가 $\theta_d = 90^\circ$ 에서 거의 나지 않고 있으며, 특히 3번 경우에서는 동가 단면적이 기하학적 반경과 전영역에서 일치하고 있다. 따라서, 빙각 b 가 특정한 높이 대 폭비가 될 때 0° 에 균접한다는 사실을 알 수 있다. 이미 앞서 계산한 기본형상의 컨버터는, 높이 대 폭비에 있어서 2번과 3번 경우사이에 해당하며 동가파라미터값들이 그 중간변화 과정에 잘 맞아 들어간다.

결과적으로, 높이 대 폭비의 값중에는 등가 단면적과 기하학적 단면적이 일치하는 값이 존재하고, 그 값이 증기활수록 등가 반경은 $\theta_d = 0^\circ$ 와 $\theta_d = 180^\circ$ 를 중심으로 반경차이값이 집중한다는 것을 알 수 있다

4. 결과

이 논문에서는 토크 컨버터의 2차원 모델링에 의한 동적 해석방법을 제시하고, 이 방법을 이용하여 컨버터의 성능해석에 필요한 등가의 형상설계파라미터들을 구하였다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 토크 컨버터의 내부 유동을 2차원 포텐셜 유동으로 근사화하는 등가 모델링을 제시하고, 유동 해석을 수행하였다.
- (2) 컨버터 유동장의 속도분포와 같은 인자에 의해 정의되는 등가 유선을 위의 2차원 포텐셜 유동 해석의 결과를 이용하여 구하였다.
- (3) 1차원 모델링에 근거하여 별도로 정의된 기하학적 반경과 평균 반경을 계산하였다. 또한, 그것들을 등가 반경과 비교했을 때 유동장의 거동을 고려한 등가 반경은, 일정한 양상을 띠고 다른 두 반경과의 차이를 나타냈다. 따라서, 토크 컨버터의 유동장이 등가 유선의 결정에 어느 정도 영향을 끼침을 확인했다.
- (4) 본 논문에서 해석시 이용된 토크 컨버터의 기본 데이터를 일정한 비율로 변화시키고, 각 경우마다 수행된 유동 해석결과를 이용하여 등가 유선을 계산하였다. 컨버터의 웰/코어 형상변화는 컨버터 내부의 속도분포에 영향을 끼치고, 그 결과 등가유선이 규칙적으로 변화하는 경향을 나타냈다. 따라서, 컨버터의 형상변화가 등가 유선의 결정에 영향을 미친다는 사실을 정성적으로 확인했다.

참고문헌

- [1] Mathias F. Brejcha, "Automatic Transmissions", Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, second edition, pp.39-41, 1982.
- [2] T. Ishihara, "Selected Papers on Automatic Power Transmission", Publishing Committee for Selected Papers of Professor Tomoo Ishihara, pp.3-66, pp.145-176, 1985.
- [3] T. Ishihara and R. I. Emori, "Torque Convert as a Vibration Damper and Its Transient Characteristics", SAE 660368.
- [4] Design Practices : Passenger Car Automatic Transmission", Third Edition, AE-18, SAE, pp.103-118, 1994.
- [5] T. Ishihara, "Numerical Calculation of the Internal Flow of a Torque Converter", Turbomachinery, Vol.9, No.11, pp.7-12, 1981.
- [6] T. Ishihara, "An Experimental Analysis of Fluid Flow in a Torque Converter", SAE Technical Paper Series 830571, 1983.
- [7] Robert R. By and John E. Mahoney, "Technology Needs for the Automotive Torque Converter-Part 1 : Internal Flow, Blade Design, and Performance", SAE 880482.
- [8] Design Practices : Passenger Car Automatic Transmission", Third Edition, AE-18, SAE, pp.75-102, 1994.
- [9] 임원식, "토오크 컨버터를 장착한 차량의 변속과도특성에 관한 연구", 서울대학교 공학석사 학위 논문, 1991.
- [10] 임원식, "토오크 컨버터의 해석/설계와 자동변속장치의 동특성에 관한 연구", 서울대학교 공학박사 학위 논문, 1995.
- [11] 임원식, 박영일, 이창무, "토크 컨버터의 모델링을 중심으로한 변속과도 특성해석", 대한기계학회논문집, 제 19권, 제 1호, pp.132-141, 1995.