

다구찌 방법을 이용한 토크 컨버터가 차량성능에 미치는 영향 분석

이진원* · 안국현* · 박영일** · 임원식*** · 이장무****

How does a torque converter affect the vehicle performance? Torque converter analysis using Taguchi method

Chinwon Lee, Kukhyun Ahn, Y.I. Park, W.S. Lim and J.M. Lee

Key Words : 토크컨버터(Torque converter), 다구찌방법(Taguchi method), 차량성능(Vehicle performance), 연비(Fuel economy)

Abstract

General vehicle is evaluated by its acceleration, fuel economy, NVH (Noise, Vibration and Harshness) and subjective (Launching feel) performance. The first step to enhance its performance is to know how much each component affects on the vehicle performance. It is very important to know what is the key factor of the component among many specifications. Hydraulic torque converter can be expressed by means of its performance curve (torque ratio and capacity factor). In this paper, the key factor of torque converter, which affect vehicle performance, are explored by using Taguchi method.

	기호설명
C	Capacity factor (Nm/rad ² /sec ²)
tr	Torque ratio
sr	Speed ratio

km/h) 도달 시간

발전 성능: 일정한 스로틀 개도(30%)로 일정속도 및 거리(80km/h) 도달 시 까지 승차감을 주관적으로 평가

연비 성능: 공인된 주행 사이클(FTA-75 모드) 주행 시 소요 연료량으로 평가

1. 서론

토크 컨버터의 성능은 장착된 자동 변속기, 더 나아가 장착된 차량의 동력성능 및 연비 성능에 직접적인 영향을 미치므로 그 성능은 장착되는 자동 변속기, 차량과 함께 최종적으로 평가되어야 한다. 또한 토크 컨버터의 설계 혹은 선정은 전체 동력 전달계를 함께 고려하여 이루어져야 함을 의미한다.

차량 동력 성능에
가속 성능: WOT(Wide Open Throttle) 상태로 정지상태 혹은 일정속도(예:30km/h)에서 일정속도(예:100

하지만 각 부품이 상위 단계의 제품에 어떤 성능 변화를 미치는가를 개발단계에서 평가하기 위해서는 단품별 성능 지수가 필요하며, 일반적으로 토크 컨버터의 경우는 속도비에 따른 토크 증대비와 용량계수를 사용하며, 두 종류의 그래프를 성능 곡선이라 칭한다. 두 가지 성능 곡선은 항상 절대적인 토크 컨버터의 성능이 아니며, 작동 상태에 따라 가변적이므로 항상, 기준 회전 속도(예: 임펠러 2000rpm), 작동 온도 범위(예: ATF 75°C), 그리고 작동 압력(예: 입구압력 기준 6kgf/cm²) 등이 함께 명시되어야 한다.

속도비: 일반적으로 0 에서 1 사이의 값을 가진다.

$$sr = \frac{\omega_t}{\omega_p}$$

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원
 ** 서울산업대학교 자동차 공학과
 *** 서울산업대학교 기계설계학과
 **** 서울대학교 기계항공 공학부

토크 증대비: 승용차용의 경우 대략 2.4~1.0의 값을 가진다.

$$tr = \frac{T_t}{T_p}$$

용량 계수 (전달 용량, C factor): 승용차용의 경우 대략 $3.0 \times 10^{-3} \sim 0$ 의 값을 가진다.

$$C = \frac{T_p}{\omega_p^2} \left[\frac{Nm}{(rad/sec)^2} \right]$$

본 논문에서는 토크 컨버터 단품의 성능이 전체 차량에 미치는 영향을 다구저의 실험계획법을 이용하여 분석하였다. 이는 토크 컨버터의 개발 단계에서 차량의 특정 성능을 개선하기 위해서 토크 컨버터 단품의 어떤 성능을 고쳐야 하는지에 대한 판단 근거를 제시한다는 점에서 그 의미가 있다.

2. 단순 민감도 분석과 실험계획법

2.1 민감도 분석과 실험계획법의 비교

정확한 시스템의 수학적 모델링이 없을 경우, 시스템의 특성을 파악하기 위해서는 성능 및 설계 인자를 변화시켜가며 시스템의 특성을 파악하게 된다. 특히 전산기의 발달과 함께, 유산요소해석 및 전산유체 해석이 늘어가며 인자를 변화시키며 행하는 실험(수치실험)의 필요성이 점점 증가하고 있다. 하지만 단순한 파라메트릭 분석은 인자의 개수가 n 개로 늘어남에 따라 x^n 번의 실험이 필요하게 되므로, 그 실용성이 매우 한정되어 있다.

이 때 실험 횟수를 줄이면서도 효과적으로 인자 변화에 따른, 시스템의 특성을 파악할 수 있는 대안으로 과거에는 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 많이 사용하였다. 민감도 분석 방법은 시스템이 수학적으로 모델링이 되어 있을 경우 매우 효과적이나, 실험적으로 시스템을 분석해야 할 경우는 파라메트릭(Parametric) 분석과 비슷한 문제뿐만이 아니라 선형성을 보장하는 인자의 범위를 결정하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이 절에서는 주로 실험계획법에서 많이 사용되던 직교배열(Orthogonal Array)을 이용한 평균분석(ANOM: Analysis of Mean) 및 분산분석(ANOVA: Analysis of Variance) 방법을 사용하여, 수학적으로 모델링이 어려운 시스템, 혹은 모델링에 빠진 인자의 영향을 파악하려는 시스템을 분석하는 방법에 대해 논하였다.

n 개의 인자에 의해 영향을 받는 임의의 시스

템의 성능을 F 라고 하자.

$$x \in R^n, \quad x_i \in R, \quad F(x) \in R$$

성능 함수 $F(x)$ 가 다음과 같이 전개 될 때

$$F(x) = F(x_0) + \sum \frac{\partial F}{\partial x_i} \Big|_{x_0} \cdot x_i + \sum \frac{\partial^2 F}{2\partial x_i \partial x_j} \Big|_{x_0} \cdot x_i x_j + O(x^4), \quad k \geq 3$$

1 차 민감도는 다음과 같이 변화량의 크기로 정의할 수 있다.

인자 x_i 의 민감도 척도(Sensitivity metric)

$$= \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \Big|_{x_0} \right|^2 = \left| \frac{F(x_i + \Delta) - F(x_i)}{\Delta} \right|^2$$

물론 역학 시스템 $\dot{z} = f(z, p, t)$ 의 경우, 시스템의 상태변수 z 와 인자 p 를 고려하여 민감도의

척도를 $I_k = \sqrt{\sum_{k=1}^n |v_j^k|^2}$ 와 같이 정의할 수 있으나

[1], 이 글에서는 시스템 성능 F 와 인자 x 사이의 변화량을 민감도의 메트릭으로 정의하여 사용하였다.

민감도 분석은 시스템의 선형성이 보장될 경우만 의미가 있으므로, 시스템을 설계점 근방(neighborhood of design point)에서 선형화 하고, 인자를 선형성을 보장하는 영역(domain)에서 분석하여야 한다.

즉, 시스템은 $x_0 \in R^n$ 근방에서 선형적이라는 다음 가정이 성립하여야 한다.

$$\forall \epsilon, \exists \delta \quad \|x - x_0\| < \delta \Rightarrow \|O(x^k)\| \leq \epsilon, \quad k \geq 2$$

2.2 직교배열을 이용한 실험분석

직교배열 $OA(k, s)$ 란 S 집합의 s 개의 원소를 포함하는 $k \times s^2$ 배열이며, 임의의 두 행에서 정렬된 한 쌍의 S 에 속하는 원소는 단 한번만 존재한다. (An orthogonal array $OA(k, s)$ is $k \times s^2$ array with entries taken from an s -set S having the property that in any two rows, each ordered pair of symbols from S occurs exactly once.) [2]

따라서 k 개의 인자와 각 인자에 대해 s 수준의 실험을 행할 경우, $OA(k, s)$ 직교배열을 사용하면 어느 한 인자에 치우침이 없이 최소한의 실험으로 각 인자의 영향을 분석할 수 있다. 즉, 전체 ks^2 의 실험 중 각 인자의 각 수준이 s 번 반복될 때, 다른 인자는 골고루 한 번씩만 재현되는

특징을 갖는다. 이러한 직교배열 중 다구찌등[3]이 실험계획에 적합한 표준 배열을 표 1 과 같이 정리하였다.

Table 1 Standard Orthogonal Arrays

OA	# of Rows	Max # of factors	Maximum # of columns at these level			
			2	3	4	5
L4	4	3	3			
L8	8	7	7			
L9	9	4		4		
L12	12	11	11			
L16	16	15	15			
L'16	16	5			5	
L18	18	8	1	7		
L25	25	6				6
L27	27	13		13		
L32	32	31	31			
L'32	32	10	1		9	
L36	36	23	11	12		
L'36	36	16	3	13		
L50	50	12	1			11
L54	54	26	1	25		
L64	64	63	63			
L'64	64	21			21	
L81	81	40		40		

Table 2 L4 Orthogonal Array: OA(3,2)

L4	Level 2		
	Level 1	Level 2	Level 3
Experiments	Factor 1	Factor 2	Factor 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

따라서 i 번째 인자의 j 수준의 평균은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$m_{ij} = \frac{1}{s} \sum_{p \in S_j} y_p$$

y_p : p 번째 실험 결과

S_{ij} : i 번째 인자의 j 수준을 포함한 실험 집합

예) L4 배열에서 2 번째 인자의 1 수준 값은

$$m_{21} = \frac{1}{2}(y_1 + y_3) \text{로 계산할 수 있다.}$$

민감도 분석의 경우, 인자의 영역이 미리 설정

되어 있으므로 민감도 metric 을 비교함으로써 시스템에 영향을 많이 주고, 적게 주는 인자의 비교가 가능하다. 직교배열을 이용한 실험계획법의 경우는 어떤 인자가 얼마나 많은 영향을 시스템에 주는가는 분산분석(ANOVA: Analysis of Variance)을 통해 가능하다.

시스템 해석의 경우, 분산이 크면 클수록 시스템에 영향을 미치는 정도가 큼을 의미하므로 각 인자의 영향도는 다음과 같이 제곱 평균 등을 구하여 비교해 볼 수 있다

i 번째 인자의 제곱 평균 합 (SS: Sum of Square)

$$SS_i = \sum_{j=1..s} (m_{ij} - m)^2$$

$$m = \frac{1}{N} \sum_{p=1..N} m_p$$

예) L4

Factor	Sum of Square	Factor Effect
1	2500	62.5%
2	1000	25.0%
3	500	12.5%

2.3 Parametric Study, 민감도 해석, 직교배열을 사용한 평균분석의 비교

시스템에 영향을 주는 인자가 k 개 있을 때, s 가지 수준의 변화를 주어 실험 혹은 해석하는 경우의 수를 비교해 보면 다음 표와 같은 횟수의 실험(해석)이 필요하다.

Table 3 Number of experiments required

	Parametric Study	Sensitivity Analysis	ANOM with OA
# of experiments	s^k	ks	$O(ks)$

직교 배열의 생성은 combinatorial mathematics 를 응용하여 컴퓨터로 계산하여야 하므로, 해석적으로 민감도 분석방법과 직교배열을 이용한 평균 분석 방법을 비교할 수는 없으므로 그림에 수치적인 비교결과를 제시하였다. 인자의 개수를 실용적으로 25~30 까지 변화 시켜 나갈 때, 2 개의 수준을 이용하는 경우는 직교배열을 이용하는 것이 0~10 여 번의 실험을 덜 해도 됨을 알 수 있다. 하지만 3 개 이상의 수준을 이용하는 경우는, 인자의 개수가 적을 경우는 실험횟수가 비슷하고, 인자의 개수가 많아질수록 직교배열을 이용하는 것이 유리해 짐을 알 수 있다.

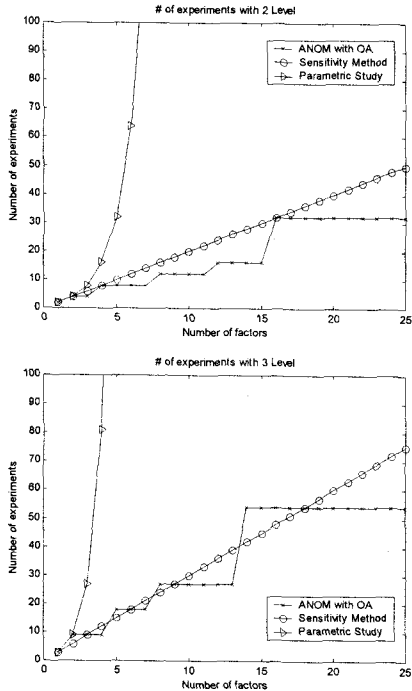


Fig. 1 Comparison of test required

간단한 예제

$$F(x) = -x_1x_2 + x_3^2 + x_2$$

1. 해석적 분석

$$\frac{\partial F}{\partial x_1} = -x_2 \quad \frac{\partial F}{\partial x_2} = -x_1 + 1 \quad \frac{\partial F}{\partial x_3} = 2x_3$$

2. Sensitivity Analysis

$x_0 = [1 \ 1 \ 1]$ 에서 해석 결과

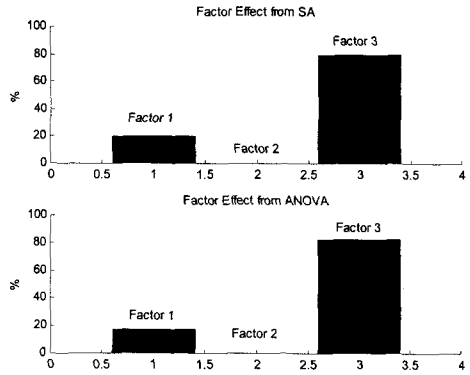
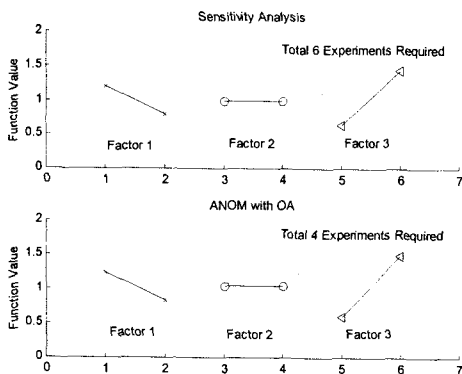


Fig. 2 Analysis for the simple example system

이상의 간단한 결과로부터 두 가지 방법은 간단한 시스템에 대한 같은 분석결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 직교 배열을 이용한 시스템 분석방법은 실험횟수의 측면, 인자의 분석의 범위 측면에서 일반적인 민감도 분석에 비해 유리하다.

3. 토크 컨버터의 성능인자

3.1 실험 설계

토크 컨버터의 특정 성능이 전체 차량에 미치는 영향을 분석하기 위해서 다구찌의 실험계획법을 사용하였다. 다구찌 방법은 본래 품질 관리의 개념으로부터 출발하여 제품의 강인 설계방법으로 주목 받고 있으며, 그 핵심개념은 직교 배열을 이용한 실험을 통하여 각각의 인자들이 최종 성능에 영향을 상대적으로 얼마나 영향을 나타내는가를 분석하는 것이다.

직교배열을 이용한 실험 계획법은 기본적으로 파라미터 (인자) 최적화 방법중의 하나이므로 연속적인 곡선인 토크 컨버터의 성능 곡선을 적당한 인자들로 표현해야만 한다. 본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 성능 곡선상의 표점들을 제어점(Control point)로 이용한 B-스프라인 곡선으로 가정하여 문제를 정형화 하였다. 대표적인 표점은 다음과 같다.

스틀점: 임펠러 축(엔진축)은 회전하고 있으나 터빈 축(출력 축)은 정지하고 있는 점으로 속도비가 0.0 인 점.

커플링 점: 토크 증대비가 1.0 이 되기 시작하는 점. 스테이터가 정지상태에서 회전하기 시작하는 점.

최대 효율점: 속도비가 커플링 점보다 작은 구간에서 효율이 최고인 점.

최대 용량계수점: 용량 계수가 가장 큰 점.

용량 계수 곡선의 표현

$$f(T0, T1, Tm)$$

토크 증대비 곡선의 표현

$$f(C0, C1, Cm)$$

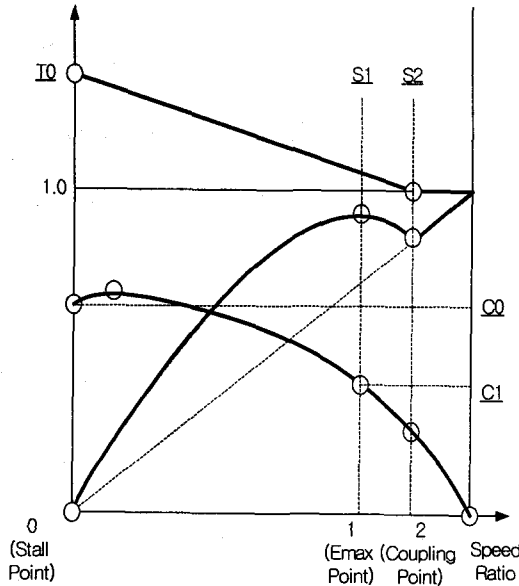


Fig. 3 Performance variation

기존의 1.5L 급 엔진과 매칭되는 토크 컨버터의 성능 곡선에 변화를 주어 (파라메트릭 스테디) 대상 차량의 성능이 가장 적합한 토크 컨버터의 성능을 목표로 한다. 이 때 수많은 실험 경우의 수를 최소화 하기 위해 직교 표를 사용하는 다구 췌 실험 계획법을 적용하였다.

Table 4 Factor variations

	스 틀 크 비	스 틀 용 량 계 수	최 대 효 율 점	최 대 효 율 점 용 량 계 수	커 플 링 점
Level 1	2.10	1.7E-3	0.70	1.4E-3	0.81
Level 2	2.30	1.9E-3	0.80	1.6E-3	0.86

Table 5 Orthogonal array for various TC performance

	스 틀 크 비	스 틀 용 량 계 수	최 대 효 율 점	최 대 효 율 점 용 량 계 수	커 플 링 점
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2

3	1	2	2	1	1
4	1	2	2	2	2
5	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1
7	2	2	1	1	2
8	2	2	1	2	1

이러한 다구 췌 격자 배열을 사용하면 쉽게 빠르게 차량 성능의 향상에 적합한 토크 컨버터를 찾을 수 있다. 또한 베이스 모델을 기준으로 설계 변경을 통해 실제 실패의 위험성을 줄일 수 있다. 위 표에서 언급한 바와 같이 총 5 개의 인자를 2 수준으로 변화시키는 직교표로부터 다음과 같이 8 종류의 토크 컨버터 성능 곡선을 도출하였다.

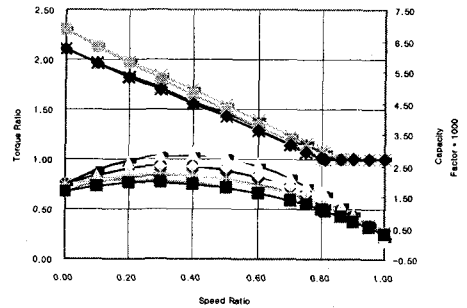


Fig. 4 8 variations of TC performance

8 개의 토크 컨버터의 성능이 변화 할 때 차량의 연비 성능과 동력성능의 변화를 살펴 보기 위하여 ADVISOR 3.0¹을 사용하여 분석하였다. 대상차량으로 63kW 급 가솔린 내연기관 엔진과 4 단 자동 변속기를 탑재한 공차중량 1059kg 의 소형 차량을 모의실험에 사용하였다.

¹ <http://www.ctts.nrel.gov/analysis/about.html>

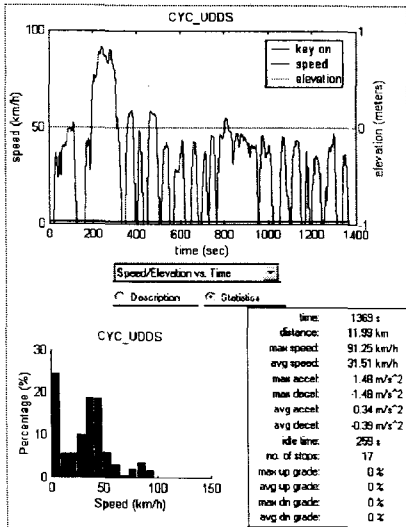


Fig.5 Two road cycles used for evaluating vehicle performance

모의 실험결과로부터 고속도로 주행 시는 토크 컨버터의 성능 변화가 차량의 연비에 거의 영향을 주지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 대부분의 운전영역에서 토크 컨버터의 임펠러와 터빈 축이 직결되어 (복합 구간) 유체를 통하지 않고 동력이 전달되었기 때문이다.

Table 6 Vehicle Performance

		연비 (mile/ gallon)	0-60 (mph) (sec)	40- mph (sec)
TC1	시내	28.523	12.079	6.390
	고속 도로	41.903		
TC2	시내	29.273	11.773	6.138
	고속 도로	41.996		
TC3	시내	29.086	11.667	5.985
	고속 도로	41.928		
TC4	시내	29.537	11.638	5.902
	고속 도로	42.007		
TC5	시내	29.740	11.700	6.043
	고속 도로	42.042		
TC6	시내	29.325	11.774	5.957
	고속 도로	41.956		
TC7	시내	29.189	11.692	6.175
	고속	42.038		

	도로			
TC8	시내	29.170	11.720	6.083
	고속 도로	41.965		

3.2 각 인자별 연비 영향도

차량의 연비에 영향을 주는 인자는 분산 분석 결과로부터 보듯이 토크 컨버터의 커플링 점과 최대 효율점으로 판명되었다. 이는 이 두 점이 뒤쪽으로 갈수록 토크 컨버터의 효율이 높아지기 때문이며, 결국 토크 컨버터의 효율향상이 곧 연비 향상과 밀접한 관계가 있음을 의미한다.

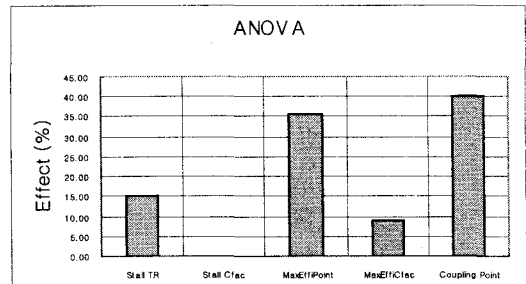
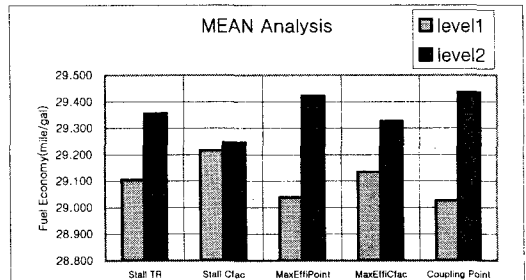


Fig.6 Fuel economy

3.3 각 인자별 가속 성능 영향도

반면 가속성능에 영향을 많이 미치는 인자는 스톱 상태의 용량 계수임을 아래 결과로부터 알 수 있다. 이는 차량의 가속성능은 첫 째 엔진과 얼마나 잘 매칭된 토크 컨버터가 사용되었는지 여부로 결정 됨을 의미한다.

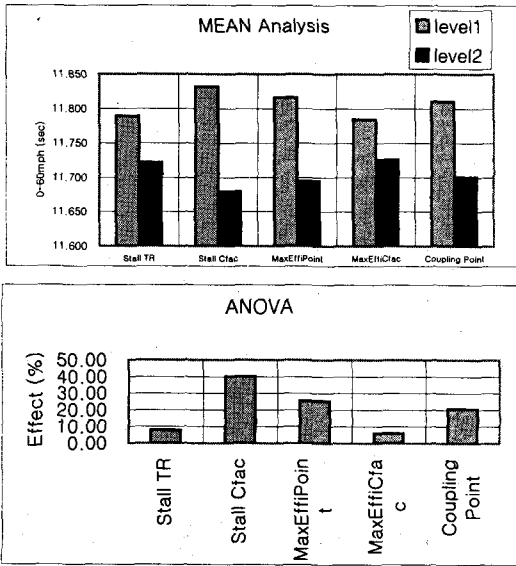


Fig.7 Acceleration Performance

4. 결론

부품의 성능 중 중요도가 높은 인자를 찾아 내기 위하여 다구찌 방법을 사용하였다. 토크 컨버터의 경우 연비에 중요한 영향을 미치는 인자는 커플링점의 위치와 그 때의 용량 계수임을 알았으며, 가속성능 역시 스톱 토크비 보다는 용량계수에 더욱 의존적임을 알았다. 이로부터 토크 컨버터의 선정 혹은 설계시, 용량매칭의 중요성을 알았다.

다구찌 방법은 실험적으로 그 성능을 파악할 수 있다는 점과 그 실험횟수를 줄일 수 있다는 점에서 매우 유용하나, 그 성능 인자의 선택과 검증에 좀더 통계학적이고 엄밀한 선택방법이 연구 되어야 한다.

후 기

이 연구는 대우통신(株)와 서울대학교 정밀기계 연구소에서 수행한 승용차용 토크 컨버터의 개발 프로젝트의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Andrzej G. NALECZ, 1989, "Application of Sensitivity Methods to Analysis and Synthesis of Vehicle Dynamic Systems"
- (2) Colbourn, C.J. and Dinitz, J.H. (Eds.), 1996, "CRC

- Handbook of Combinatorial Designs." Boca Raton, FL: CRC Press, p.111
- (3) G. Taguchi, 1990, "Application of Orthogonal Array"
 - (4) Phadke, S.M., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.