

다구찌 방법을 이용한 토크 컨버터의 차량 연비 및 가속성능에 미치는 영향 분석

이진원[†] · 임원식* · 박영일* · 이장무**

(2001년 7월 28일 접수, 2002년 3월 5일 심사완료)

Analysis of a Vehicle Performance Using Taguchi Method: How does a Torque Converter Affect the Vehicle Performance?

Chinwon Lee, Won Sik Lim, Yeong Il Park and Jang Moo Lee

Key Words : Torque Converter(토크컨버터), Taguchi Method(다구찌방법), Vehicle Performance(차량 성능), Fuel Economy(연비)

Abstract

General vehicle is evaluated by its acceleration, fuel economy, NVH (Noise, Vibration and Harshness) and subjective (such as 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. Moreover, general sensitivity analysis method is compared with Taguchi's experiment.

기호설명

C	: 용량계수 (Nm/rad ² /sec ²)
tr / T	: 토크비
sr / S	: 속도비
ω	: 회전속도
T	: 토크
Y	: 실험 결과치(연료 소비율 혹은 시간)
i	: 제어변수의 첨자
j	: 잡음변수의 첨자
p	: 펌프의 첨자
t	: 터빈의 첨자
0	: 스톱점의 첨자
l	: 커플링점의 첨자
m	: 최고 효율점의 첨자

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 평가 되어야 한다. 또한 토크 컨버터의 설계 혹은 선정은 전체 동력 전달계를 함께 고려하여 이루어 져야 함을 의미한다.

차량 동력 성능으로는 엔진이 WOT(Wide Open Throttle) 상태로 정지상태 혹은 일정속도(예:30km/h)에서 일정속도(예:100 km/h) 도달 시간을 측정하는 가속성능, 일정한 스톱 개도를(예:30%)로 일정속도 및 거리(예:80km/h) 도달 시 까지 승차감을 주관적으로 평가하는 발진성능, FTA-75 모드등의 공인된 주행 사이클 주행 시 소요 연료량으로 평가하는 연비성능 등이 있다.

하지만 각 부품이 상위 단계의 제품에 어떤 성능 변화를 미치는가를 개발단계에서 평가하기 위해서는 단품별 성능 지수가 필요하며, 일반적으로 토크 컨버터의 경우는 속도비에 따른 토크 증대비

[†] 책임저자, 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

E-mail : chinwon@bawi.org

TEL : (02)880-8050 FAX : (02)889-6205

* 회원, 서울산업대학교 자동차 공학과

* 회원, 서울산업대학교 기계설계학과

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

와 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.

$$sr = \frac{\omega_i}{\omega_p} \quad (1)$$

토크 증대비: 승용차용의 경우 대략 2.4 ~ 1.0 의 값을 가진다.

$$tr = \frac{T_l}{T_p} \quad (2)$$

용량 계수 (전달 용량, C factor): 승용차용의 경우 대략 3.0×10⁻³ ~ 0 의 값을 가진다.

$$C = \frac{T_p}{\omega_p^2} \left[\frac{Nm}{(rad/sec)^2} \right] \quad (3)$$

본 논문에서는 토크 컨버터 단품의 성능이 전체 차량에 미치는 영향을 다구찌의 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 들어가며 인자를 변화시키며 행하는 실험(수치실험)의 필요성이 점점 증가하고 있다. 하지만 단순한 파라메트릭 분석은 인자의 개수가 n 개로 늘어남에 따라 xⁿ 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 효과적이거나, 실험적으로 시스템을 분석해야 할

경우는 파라메트릭(Parametric) 분석과 비슷한 문제 뿐만이 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 시스템의 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

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

1 차 민감도는 다음과 같이 변화량의 크기로 정의할 수 있다.

인자 x_i의 민감도 척도(Sensitivity metric)

$$= \left| \frac{\partial F}{\partial x_i} \Big|_{x_0} \right|^2 = \left| \frac{F(x_{i0} + \Delta) - F(x_{i0})}{\Delta} \right|^2 \quad (4)$$

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

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

나,⁽¹⁾ 이 논문에서는 식 (4)와 같이 시스템 성능 F 와 인자 x 사이의 변화량을 민감도의 척도로 정의하여 사용하였다.

민감도 분석은 시스템의 선형성이 보장될 경우 만 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 반복 될 때, 다른 인자는 골고루 한 번 씩 만 재현되는 특징을

Table 1 L4 orthogonal array: OA(3,2)

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

Table 2 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		

갖는다. 이러한 직교배열 중 다구찌 등⁽³⁾ 이 실험 계획에 적합한 표준 배열을 Table 1 과 같이 정리하였다.

직교표의 성질을 이용하여 실험을 수행하면 i 번째 인자의 j 수준의 평균은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$m_{ij} = \frac{1}{s} \sum_{p \in S_{ij}} y_p \quad (5)$$

y_p : p 번째 실험 결과

S_{ij} : i 번째 인자의 j 수준을 포함한 실험 집합

다구찌 분석을 포함한 일반적인 민감도 분석의 경우, 분석할 인자의 영역이 미리 설정되어 있는 민감도 척도를 비교함으로써 시스템에 영향을 많이 주고, 적게 주는 인자의 비교가 가능하다. 즉, 분산분석(ANOVA: Analysis of Variance)을 통하면 각 인자가 최종 성능에 어느 정도 영향을 주는 가를 상대적으로 비교해 볼 수 있다. 즉, 시스템 해석의 경우, 분산이 크면 클수록 시스템에 영향을 미치는 정도가 크을 의미하므로 각 인자의 영향도는 다음과 같이 제곱 평균 등을 구하여 비교해 볼 수 있다

i 번째 인자의 제곱 평균 합 (SS: Sum of Square)

$$SS_i = \sum_{j=1..s} (m_{ij} - m)^2 \quad (6)$$

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

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.

직교 배열의 생성은 조합수학의 한 분야로 컴퓨터로 계산하여야 하므로, 해석적으로 민감도 분석 방법과 직교배열을 이용한 평균 분석 방법을 비교 할 수는 없으므로 수치적인 비교결과를 통하여 분석하였다. 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.

Table 3 Number of experiments required

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

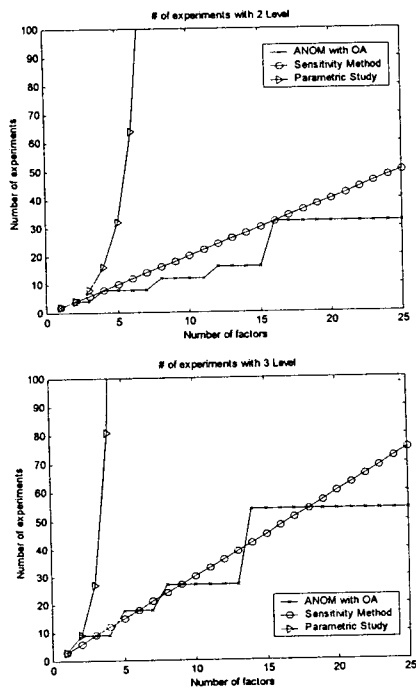


Fig. 1 Comparison of test required

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

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.

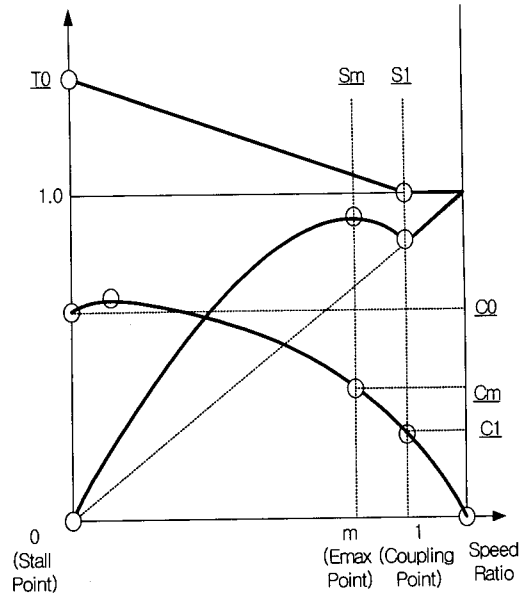


Fig. 2 Performance curve and its describing points

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 제어 점(Control point)로 이용한 B-스프라인 곡선으로 가정하여 문제를 정형화 하였다. 대표적인 표점으로 다구찌 실험 방법에서 제어 변수로 선택 할 수 있는 변수는 다음과 같다.

스톨점: 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 표현은 C0, C1, Cm 점을 사용한 스프라인 곡선으로 묘사 하였으며 토크 증대비 곡선은 커플링 점 앞에서는 T0, T1 점을 사용하고 커플링 점 이후는 직선으로 묘사 하였다.

이상의 성능 곡선을 대표하기 위하여 표점을 이용하여 제어 변수를 선정하고 그 변화 폭을 Table 4 와 같이 선정하였다. 전체적인 실험은 1.5L 급 가솔린 엔진을 장착한 소형 차량에 대하여 수행되므로 매칭되는 토크 컨버터의 성능 곡선 역시 소형차급에서 사용 가능한 범위에서 변화할 수 있도록 하였다.

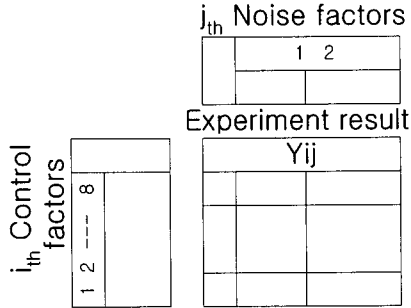


Fig. 3 Control factors and noise factors

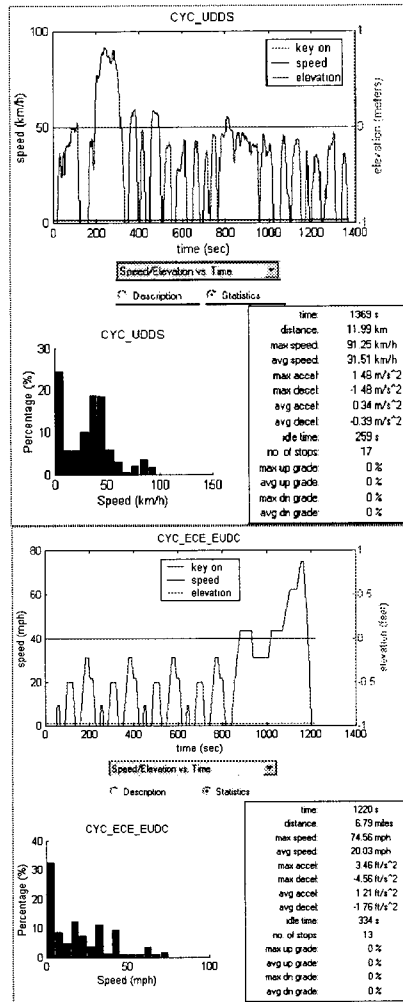


Fig. 4 Two city road cycles used for evaluating vehicle performance

표점 (제어 변수)이 선정되었으므로 앞에서 기술한 바와 같이 토크 컨버터의 성능 곡선을 묘사할 수 있고 묘사된 성능 곡선을 이용하여 차량의 수치실험을 수행 하였다.

Table 4 Control factor variations

	스톨 토크비	스톨 용량계수	최대 효율점	최대 효율점 용량계수	커플링점
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 arrays for TC performance

	스톨 토크비	스톨 용량계수	최대 효율점	최대 효율점 용량계수	커플링점
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

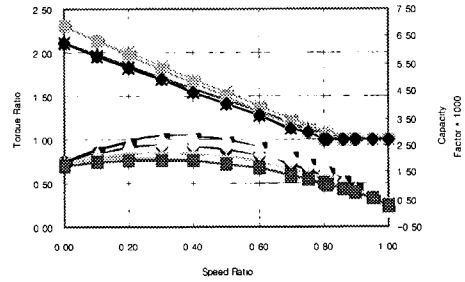


Fig. 5 8 variations of TC performance

차량 성능에 영향을 주는 인자는 토크 컨버터 뿐 아니라, 엔진과 변속기를 포함한 동력 전달계의 구조와 주행 형태 (Road cycle), 그리고 변속 전략(Shift map)에 따라 크게 영향을 받게 된다. 본 논문의 목적은 토크 컨버터의 성능 변화가 차량 성능에 어떻게 영향을 주는지 파악하는 것이므로 이러한 동력 전달계의 구성은 모두 잡음으로 간주할 수 있다. 이 중 대상 차량에 관계된 부분은 고정되어 있다고 가정하고 주행 형태에 따른 성능 변화를 고려하기 위하여 세 개의 주행 형태를 잡음 행렬로 실험에 포함 하였다.

사용된 주행 형태는 Fig. 4 에 보이는 바와 같이 미국에서 대표적으로 사용되는 시내 주행 형태는 LA-4 모드 (UDDS)와 새로운 유럽 표준 시내 주행 모드 (ECE_EUDC)를 사용하였다.

제어 변수와 관련된 직교 배열은 Table 5 와 같이 총 5 개의 인자를 2 수준으로 변화시키는 직교표를 사용하였다. 이로부터 Fig. 5 와 같이 8 종류의 토크 컨버터 성능 곡선을 도출하였다. 잡음 변수와 관련한 실험은 토크 컨버터가 자주 사용되는 시내 구간만을 선택하여 두 가지의 잡음 요인을 고려하여, Fig. 3 과 같이 각각의 잡음요인 별로 격

Table 6 Vehicle performances

	0-100Km/h (sec)	UDDS (Km/L)	ECE_EUDC (Km/L)	HWY (Km/L)
TC1	13.0	8.25	8.09	12.66
TC2	12.7	8.04	7.99	12.65
TC3	12.6	8.09	8.00	12.62
TC4	12.5	7.96	7.94	12.61
TC5	12.5	7.91	7.91	12.62
TC6	12.7	8.02	7.97	12.63
TC7	12.6	8.06	7.99	12.67
TC8	12.6	8.06	7.99	12.64

자 배열 시험을 수행하였다. 이러한 다투찌 격자 배열을 사용하면 쉽게 빠르게 차량 성능의 향상에 적합한 토크 컨버터를 찾을 수 있다. 또한 베이스 모델을 기준으로 설계 변경을 통해 설계 실패의 위험성을 줄일 수 있다.

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

수치 실험 결과의 요약은 Table 6 과 같다. 실험 결과로부터 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 (록업 구간) 유체를 통하지 않고 동력이 전달되었기 때문이다.

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.

평균 분석은 연비 값을 분석한 결과와 S/N 비를 이용해 분석한 결과를 모두 도시 하였다. 연비의 경우 단위 사용 연료 당 주행 거리로 정의하였으므로 크면 클수록 좋은 경우이고 이 때의 S/N 비는 다음과 같이 정의 하였다.

$$S/N = -10 \log_{10} \sum_j \frac{1}{n} y_{ij}^2 \quad (7)$$

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

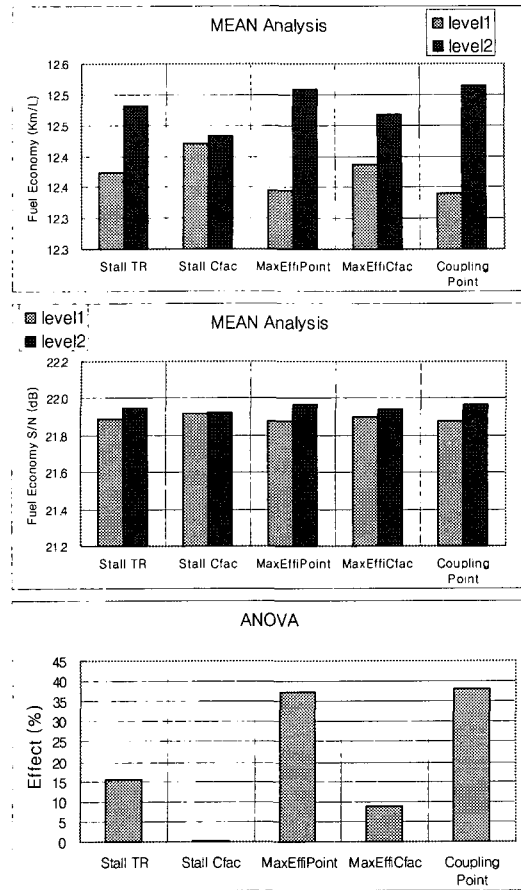


Fig. 6 Fuel economy

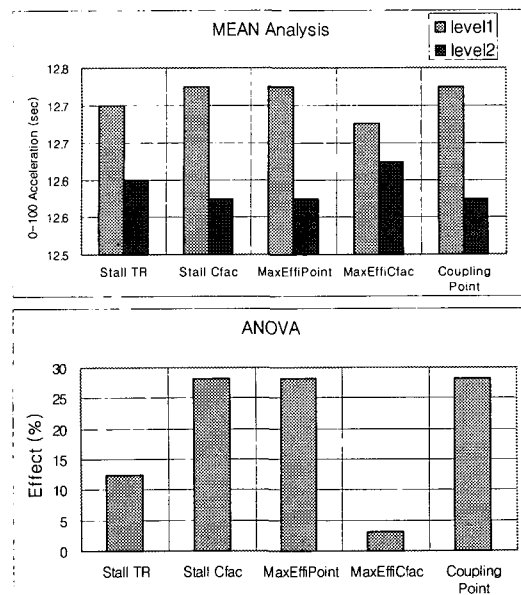


Fig. 7 Acceleration performance

3.3 각 인자별 가속 성능 영향도

반면 가속성능에 영향을 많이 미치는 인자는 커플링 점과 최대 효율점 뿐만 아니라 스톱 상태의 용량 계수도 많은 영향을 줌을 분산 분석 결과로부터 알 수 있다. 이는 차량의 가속성능은 첫 째 엔진과 얼마나 잘 매칭된 토크 컨버터가 사용되었는지 여부로 결정 됨을 의미한다. 가속 성능을 분석할 경우, 가속성능이 도로 주행 형태에 따라 변하는 값이 아니므로 S/N 비를 사용한 분석은 할 필요가 없게 된다.

4. 결론

부품의 성능 중 중요도가 높은 인자를 찾아 내기 위하여 다구찌 방법을 사용하였다. 다구찌 방법은 실험적으로 그 성능을 파악할 수 있다는 점, 그 실험횟수를 줄일 수 있다는 점, 그리고 잡음에 대한 영향을 분석할 수 있다는 점에서 매우 유용하나, 그 성능 인자와 잡음 인자의 선택과 검증에 좀더 통계학적이고 엄밀한 선택방법이 연구 되어야 한다.

적절히 토크 컨버터가 매칭된 차량의 경우 용량 계수 혹은 토크 증대비등의 성능 곡선이 10% 정도 변함에 따라 전체 차량의 연료 소비량은 약 2% (0.1dB) 정도의 변화가 가능하며, 출발 가속도의 경우도 약 0.1 초 (0.1dB)의 변화가 가능함을 알 수 있다.

또한 연비에 중요한 영향을 미치는 상대적인 인자는 커플링 점의 위치와 그 때의 용량 계수임을 알았으며, 가속성능 역시 일반적으로 알려진 스톱 토크비 보다는 용량계수에 더욱 의존적임을 알았

다. 따라서 토크 컨버터의 주 설계 목표는 자체적인 성능이나 효율의 개선 보다는, 다양한 주행상황에서 엔진이 효율적으로 영역에서 작동할 수 있도록 용량계수의 선정에 두어야 함을 알 수 있다.

후 기

이 연구는 대우통신(주)와 서울대학교 정밀기계연구소에서 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*, University of Missouri, Columbia, pp. 1~44.
- (2) Colbourn, C.J. and Dinitz, J.H. (Eds.), 1996, *CRC Handbook of Combinatorial Designs*, Boca Raton, FL: CRC Press, p. 111.
- (3) Taguchi, G., 1993, *Taguchi on Robust Technology Development*, ASME, NY, pp. 87~108.
- (4) Phadke, S.M., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- (5) Mascio, R.Di, and Barton, G.W., 2001, "The Economic Assessment of Process Control Quality Using a Taguchi-based Method," *Journal of Process control* Vol. 11, pp. 81~88.
- (6) 장옥진, 임원식, 이장무, 1999, "등가 성능모형을 이용한 토크 컨버터의 기초 설계에 관한 연구," *대학 기계학회 논문집 A*, Vol. 21, No. 3, pp. 369~377.