

엔진 윤활특성과 연비 상관성에 대한 연구

오정준¹ · 차상엽¹ · 정도곤^{2*} · 이종주²

¹현대자동차(주) 연구개발본부, ²S-OIL 연구소

Correlation between Lubrication Characteristics of Engine and Fuel Economy

JungJoon Oh¹, SangYeob Cha¹, DoGon Jeong^{2*} and JongJu Lee²

¹Research & Development Division of Hyundai-Kia Motors Corporation

²Research & Development center, S-OIL Corporation

(Received March 17, 2014 ; Revised April 15, 2014 ; Accepted April 17, 2014)

Abstract – This paper presents the results of an experimental investigation of the correlation between the lubrication characteristics of an engine and its fuel economy. Improving the lubrication characteristics of the engine oil is one of the most efficient ways to improve a car's fuel economy. The methods to accomplish this include lowering the viscosity, adding a friction modifier and optimizing the shear stability index of a viscosity index improver. In addition, it is necessary to use different methods to reduce the friction to individual lubrication areas, because different lubrication regimes are used for different engine parts. The experimental investigation in this study is based on design of experiments ; this paper presents the results of a modified Sequence VID test, which is an ASTM standard test used to measure the effects of automotive engine oils on the fuel economy of passenger cars. The results demonstrate the effects of the following lubrication factors on the fuel economy : the low temperature cranking viscosity, high-temperature high shear (HTHS) viscosity, friction modifier, polymer type and shear stability index of the viscosity index improver. Moreover, this study involves an analysis of variance based on design of experiments. The test results show that the HTHS viscosity, friction modifier and shear stability index of the viscosity index improver are more effective than the other factors. Therefore, lowering the viscosity, adding a friction modifier and optimizing the shear stability index of a viscosity index improver should be considered to improve fuel economy.

Keywords – fuel economy (연료 효율), friction modifier (마찰조정제), high-temperature high-shear viscosity (고온고전단점도), lubrication regime (윤활영역), shear stability index (전단안정성지수)

1. 서 론

최근 환경문제의 관련하여, 전 세계적으로 자동차 연비에 대한 규제가 점점 강화되고 있으며, 이에 연비 향상을 위한 기술 개발이 가속화 되고 있다. 연비개선은 연료소비량을 감소시킴으로써, 대표적인 Greenhouse gas 인 이산화탄소 배출량을 저감시키기 때문에 환경문제를

위해 필수적으로 요구되는 기술 사항이며, 이를 위해 엔진 효율의 향상, 차량의 경량화, 동력전달 효율향상 등과 관련한 연비 개선 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 차량 주행 시, 엔진 내 연소/마찰 손실, 구동손실, 구름저항, 공기저항 등으로 인해 실제 차량 주행에 사용되는 에너지는 연료의 약 12~20% 정도에 불과한 것으로 알려져 있다.

엔진 내 에너지 손실은 연소 시 열손실과 밸브, 피스톤, 베어링 등과 같은 윤활부위의 마찰 손실에 의한 것이 대부분이다. 그 중 가장 많은 부분을 차지하는 것이

*Corresponding author : dkjeong@s-oil.com
Tel: +82-52-231-3050, Fax: +82-52-231-2861

연소 시 열 손실이며, 이에 대한 저감 노력이 지속되고는 있으나, 기술개발 한계에 이르고 있다. 이에 에너지 손실 중 상당한 부분을 차지하는 엔진오일의 마찰 저항에 의한 에너지 손실 저감을 통한 연비개선 노력이 많이 이뤄지고 있다.

2. 가솔린 엔진오일의 저 연비화

마찰저감을 위한 방법 중 윤활 개선, 즉 엔진 오일의 특성 개선에 의한 방법이 연비향상에 가장 큰 효과를 기대할 수 있다.

엔진오일에 의한 연비향상 수단으로 크게 저 점도화, 마찰조정제의 첨가, 점도지수향상제의 적절한 분자량 선정이 고려될 수 있으며, 또한 엔진마찰을 저감하기 위해서는 엔진부품 내 마찰부위에 따라 엔진오일의 윤활영역이 상이하므로, 각 윤활 영역에 따른 마찰 저감 기술 적용이 고려 되어야 한다.

Fig. 1은 엔진부품 별 주요 윤활영역을 나타내고 있다. 엔진습동부의 커넥팅로드 베어링, 크랭크축 베어링 등은 유체윤활이 지배적이므로, 이러한 엔진습동부에서는 엔진오일의 저점도화를 통해 마찰이 감소되므로 연료소비를 저감할 수 있다. 단, 엔진 오일의 점도를 너무 낮출 경우, 윤활막의 파괴로 습동부의 마찰이 증대할 수 있다.

엔진습동부에서 캠, 록커암타입의 밸브계는 경계 윤활이 지배적이므로, 마찰 저감을 위해 마찰 조정제를 첨가하므로써 연료소비를 저감할 수 있다. 단, 과량의 마찰조정제 첨가는 금속표면의 부식을 야기할 수 있어 적절한 양의 첨가가 필요하다[1,2].

실린더와 피스톤의 윤활은 혼합윤활이 주를 이루며, 탄성유체윤활(EHL:Elasto Hydrodynamic Lubrication)에서도 작동되며, 이러한 윤활영역에서의 마찰저감은

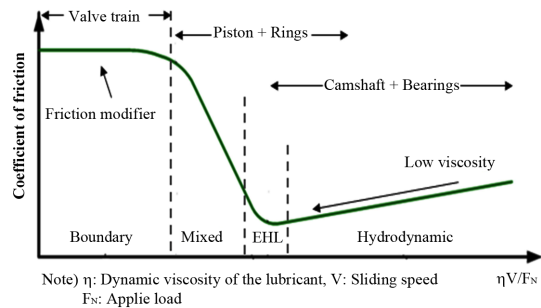


Fig. 1. Lubrication regimes.

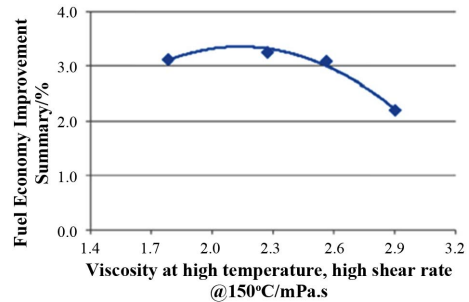


Fig. 2. Fuel economy improvement with HTHS viscosity in sequence VID test.

트랙션계수(Traction coefficient)와 점도가 낮은 엔진 오일을 사용하는 것이 가장 효과적이다[2].

2-1. 저점도화

엔진오일의 저점도화는 엔진오일의 마찰저항을 최소화하는 것으로 가장 효과적인 연비개선 방법이다.

참고문헌[3]에 따르면, 동일한 첨가제를 사용한 엔진 오일에서 고온고전단(HTHS:High Temperature High Shear) 점도에 따른 연비를 Sequence VID 시험으로 측정 한 결과, Fig. 2와 같이 고온고전단점도가 1.8~2.6 cP 범위에서 최적의 연비개선율을 보이며, 2.6 cP이상의 점도에서는 개선율이 감소하는 것으로 보고되고 있다. 일반적으로 고온고전단점도가 낮을수록, 경계윤활이 우세하고 마찰이 증가하여 연비가 나빠지는 반면, 유동 저항 저감에 의해 연비가 개선될 수 있다. 즉, 전체적으로 경계윤활에서의 연비 저하가 유체 윤활에서의 연비 개선 효과를 상쇄시킬 수 있다[3].

반면, 저점도화에 따라 캠, 피스톤, 베어링 등 윤활이 필요한 엔진요소들의 윤활저하를 야기할 수 있다. 윤활유의 점도가 낮을수록 윤활부위의 유막두께(Oil film thickness)가 얇아져 금속 접촉이 일어날 수 있으며, 특히, 베어링 부위는 미끄럼 마찰열에 의해 윤활유 온도의 급격한 상승을 유발할 수 있기 때문에 오일 점도가 심하게 저하된다.

따라서, 마찰손실 저감을 위한 윤활유의 저점도화가 필요하지만 과도한 저점도화에 의한 윤활저하를 방지하기 위해, 엔진의 설계, 부품의 가공상태 등을 고려하여 최적의 점도 설계가 필요하다.

2-2. 마찰조정제

엔진오일의 연비개선 방법으로, 마찰조정제의 첨가

에 의한 윤활개선 방안이 적용될 수 있다. 밸브트레인의 경우, 경계윤활이 지배적이므로 마찰조정제에 의한 마찰계수 저감 및 금속접촉을 감소시킴으로써 연비 개선이 가능하다.

일반적으로 유기몰리브덴 화합물과 에스테르 화합물이 마찰조정제로 사용되고 있으며, 그 중 유기몰리브덴 화합물이 경계윤활 영역에서 더 효과적인 것으로 알려져있다. 유기몰리브덴 화합물로 몰리브덴 디티오포스페이트(MoDTP, Molybdenum dithiophosphate), 몰리브덴 디티오카바메이트(MoDTC, Molybdenum dithiocarbamate)가 널리 사용되나, 몰리브덴 디티오포스페이트의 후처리장치 촉매 피독으로 인해, MoDTC가 주로 사용되고 있다.

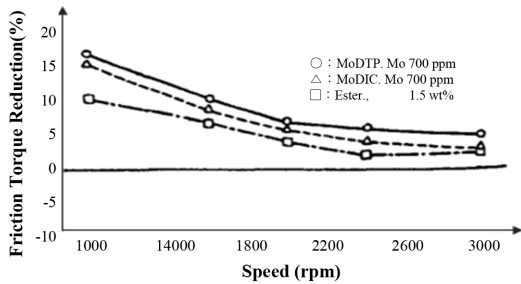


Fig. 3. Friction torque reduction with engine speed.

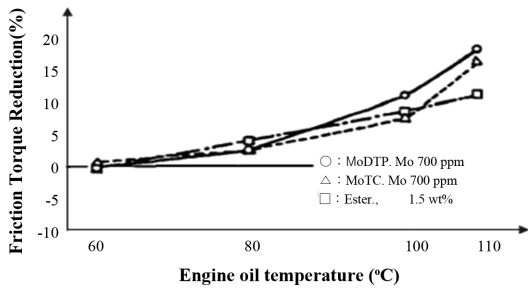


Fig. 4. Friction torque reduction with engine oil temp.

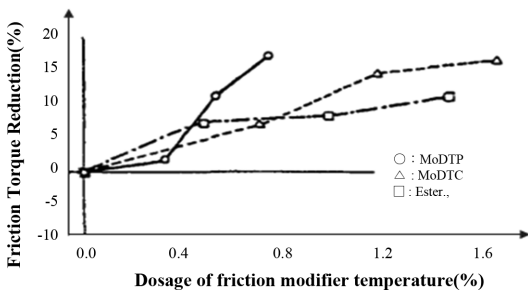


Fig. 5. Friction torque reduction with FM dosage.

참고문헌[1]에 따르면, 5W-30엔진오일에서 마찰조정제 종류 별 마찰 토크저감율을 엔진회전수, 엔진오일 온도, 마찰 조정제 첨가량에 따라 시험한 결과, 마찰조정제의 마찰 저감 효과는 Fig. 3-Fig. 5와 같이 엔진회전수가 낮을수록, 엔진오일의 온도가 높을수록, 마찰조정제의 첨가량이 증가할수록 개선되며, 또한 MoDTP계와 MoDTC계의 마찰 조정제가 에스테르계보다 마찰저감효과가 크고, MoDTP계는 소량 첨가시에도 마찰저감효과가 큰 것으로 보고되고 있다[1].

2-3. 점도지수향상제의 전단안정성

일반적으로 기유와 첨가제의 혼합물인 윤활유의 비뉴턴유체(Non-Newtonian fluid) 거동은 분자들의 방향배열에 기인한다고 알려져 있다.

참고문헌[4]에 따르면, 점도지수 향상제와 같은 폴리머가 포함되어 있는 엔진오일은 Shear-thinning 특성을 나타내는데, 이는 전단율(Shear rate)이 증가함에 따라 분자와 비대칭 입자들이 전단 방향으로 점차 배열(Alignment)되어 점성이 감소함을 의미한다. Shear-thinning효과는 대개, 폴리머분자의 방향배열(Orientation)과 변형(Deformation)에 기인하며, 분자량이 클수록 효과가 증가하게 되며 연비 향상을 기대할 수 있다. 방향배열은 긴 막대 구조 분자들의 경우, 일정 방향으로 배열되면서 분자들 서로가 미끄러져 유동 내에서 점도가 감소하는 것을 나타내며, 변형은 분자의 형상 변형(Configuration change)의 저항에 관계된다[4].

참고문헌[5]에 의하면, Fig. 6과 같이 전단안정성은 점도지수 향상제의 분자량과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 점도지수향상제의 분자량이 클수록 또는 Polymer chain이 길수록, 점도지수 및 저온점도가 개선되고 Film thickening 효과는 우수한 반면, 고전단 조건에서 점도지수 향상제의 파괴가 용이하여 영구 점

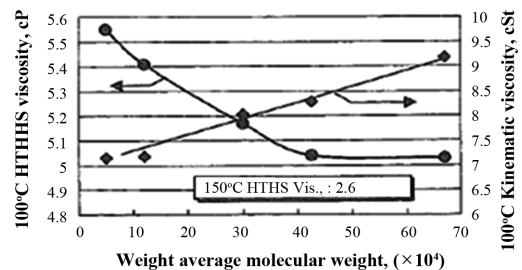


Fig. 6. Kinematic viscosity and HTHS viscosity depending on the molecular weight of polymer.

도저하에 의한 전단안정성지수(SSl, Shear Stability Index)는 높아지는 것으로 알려져 있다[5].

3. 연구방법 및 내용

본 논문에서는 윤활영역별 엔진오일 윤활 인자들의 연비개선 효과를 평가하여 최적의 엔진 오일 배합조건을 선정하고자 하였다. 실험 횟수를 줄이기 위하여 실험계획법을 적용하였고, 그 중 일부실시법과 요인배치법에 따라 실험을 설계하여 엔진오일 연비시험인 Sequence-VID를 변형한 운전 조건으로 연비시험을 실시하였다. 또한 효과적인 분석을 위해 통계분석 패키지(Minitab)를 이용하여 연비시험 결과를 분석하였다.

3-1. 인자 별 엔진오일의 배합

엔진오일의 대표적인 윤활인자 5종 - ①저온점도(Cold Cranking Simulator Viscosity), ②고온고전단점도(High

Temperature High Shear Viscosity), ③마찰조정제(Friction Modifier), ④점도지수 향상제(Viscosity Index Improver)의 전단안정성 지수 (Shear Stability Index), ⑤폴리머 종류-을 선정하고 각 인자 별 2수준을 설정하여, 인자간 유효수준 평가를 위해 일부실시법을 적용하였다.

Table 1은 1차, 2차 시험의 윤활인자 조합을 나타낸다. 전체 시험 32종(2⁵)중 직교배열표에 따라 시험 횟수를 1/4로 줄인 8종의 가솔린 엔진오일에 대해 1차 연비시험을 실시하여 연비에 영향을 미치는 유효인자를 선정하였으며, 1차에서 선정된 유효인자의 수준에 따라 연비개선 정도 및 최적의 인자간 조합을 확인하기 위해, 요인 배치법을 적용하여 2차 연비시험을 실시하였다.

3-2. 시험엔진

본 연구에 사용한 가솔린 엔진은 4기통 2,400 cc의

Table 1. Control parameters, fractional factorial design and factorial design

		Control parameter				
		①	②	③	④	⑤
Parameter		CCS	HTHS (cP)	FM (ppm)	SSI	VII
Level	0	0W	2.6	700	Low	Comb. PMA
	1	5W	3.5	0	High	PMA
(1 st Test) Test No. of Fractional factorial design	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	1
	3	0	1	1	0	0
	4*)	0	1	1	1	1
	5	1	0	1	0	1
	6	1	0	1	1	0
	7	1	1	0	0	1
	8	1	1	0	1	0
(2 nd Test) Test No. of Factorial design	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0
	3	0	0	1	0	0
	4	0	0	1	1	0
	5	0	1	0	0	0
	6	0	1	0	1	0
	7	0	1	1	0	0
	8	0	1	1	1	0

Note) Test No. 4's parameter combination of 1st Test : CCS(0W), HTHS(3.5 cP), FM(0 ppm), SSI(High), VII(PMA)

Table 2. Engine specification

Number of Cylinder	4-stroke, In-line 4
Type of Combustion	Direct injection
Max. Power, ps/rpm	201/6,300
Max. Torque, kgm/rpm	25.5/4,250

직접 분사식 연료분사 시스템을 채택하고 있으며, 엔진의 구체적 사양은 Table 2에 나타내었다.

3-3. 연비시험

연비시험은 엔진동력계(Engine Dynamometer)를 사용하여, 기술된 승용차 및 소형트럭에서 엔진 오일의 연비에 대한 영향을 측정하는 시험법인 Sequence-VID(ASTM D7598)를 기반으로 보유 장비의 상태를 고려한 안정된 시험조건 유지를 위해 일부 운전조건을 Table 3과 같이 조정하였으며, 고속/고부하 조건에서의 유효특성 확인을 위한 조건(Stage 7)을 추가하였다.

엔진의 각 운전조건(Stage)마다 1시간 동안의 안정화를 거친 후, 5분간 제동연료소비율(BSFC, Brake Specific Fuel Consumption, kg/kwhr)을 측정하며, 총 30분간 6개의 제동연료소비율을 측정한 후 그 평균 값을 각 Stage의 최종 제동연료소비율 결과로 사용한다.

또한 Sequence-VID 시험법에서 규정하는 운전조건(Stage 1~6)의 대표 연료소모량을 구하기 위하여, Table 4에 표시한 Nominal power, Stage length, Weight factor를 Stage별로 곱하고, Stage 1에서 Stage 6의 각 연료소모량을 합산한 총 연료소모량을 계산하였다. 단, 추가 운전조건인 Stage 7은 Original Sequence-VID에 명시된 Calculation factor가 없으므로, 총 연료소모량 계산에서 제외하였다.

Table 3. Modified sequence-VID test condition

Stage	Test condition						
	1	2	3	4	5	6	7*)
RPM, r/min	2000	2000	1600	1100	1100	1100	4000
Torque, Nm	105	105	100	20	20	40	200
Oil temp °C	100	65	100	100	45	100	120
Coolant °C	95	40	98	99	30	99	95

Note) Additional test condition besides Sequence-VID

Table 4. Calculation factors for fuel consumption

Stage	Nominal Speed (r/min)	Nominal Power (kW)	Stage Length (hr)	Weight Factor
1	2000	21.99	0.5	0.300
2	2000	21.99	0.5	0.032
3	1600	16.77	0.5	0.310
4	1100	2.28	0.5	0.174
5	1100	2.28	0.5	0.011
6	1100	4.63	0.5	0.172

3-4. 통계분석

1차 시험에서 적용한 일부실시법은 인자 간의 교호 작용이나 고차의 교호 작용을 구하지 않고, 각 인자의 조합 중에서 일부만을 선택하여 실험하는 방법으로, 실험 횟수를 가능한 적게 하고자 할 경우 사용한다. 이 경우, 직교 배열표에 의한 분산 분석을 통해 검정통계량(F-value)과 유의확률(P-value), R²-value를 구하여, 분석의 적합성과 인자의 유의성 차이 및 신뢰성을 판단한다. 계산된 검정통계량이 커질수록 유의확률은 감소하며, 이 경우 인자간 유의한 차이를 보일 가능성이 높아지며, 일반적으로 P-value가 0.05 이하이며 R²-value가 클수록 인자의 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

2차 시험에서 적용한 요인배치법은 1차 시험에서 선정된 각 인자의 수준 수를 동일하게 설계하여 인자들의 각 수준의 모든 가능한 결합 조건에 대해 실험을 행하는 것으로, 모든 인자의 효과 및 교호작용을 추정할 수 있는 특징이 있다. 본 시험에서는 인자가 3개인 2³형의 반복이 없는 완전 요인배치법을 적용하였으며, 통계분석 패키지를 이용하여 인자 별 효과의 분산분석 및 요인설계분석을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 5와 Table 6에는 1차 연비시험에서 적용한 1/4 일부실시험 설계에 따른 윤활 인자 조합 8종의 Sequence-VID 시험값(제동연료소비율) 및 각 운전 조건을 종합하는 총 연료소모량(Total fuel consumption)에 대한 분산분석 결과를 나타내었다.

검정통계량(F-value) 값은 집단 간 평균 제곱과 집단 내 평균 제곱의 비를 나타내며 이 차이가 통계적으로 유의한지를 분석하는 것으로서 이 값이 높을수록 인자의 변화가 제동연료소비율에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 유의확률(P-value)은 위 검정통계량의 신뢰성 또는 유의성을 나타내는 것으로서 낮을수록 인자의 변화가 제동연료 소비율에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

5가지 윤활인자 중 연비에 대한 저온점도(CCS viscosity)의 영향에 있어서, 상대적으로 저온 조건인 Stage 2, 5에서 효과가 나타나지 않는 것으로 나타났으며, 이는 차량 운전시 일반적이지 않은 냉각수 온도(30~40°C)로 인해 차량의 엔진 제어부(ECU, Engine control unit)로 조정되는 엔진이 불안정하게 운전되는 것이 원인인 것으로 추정된다. 또한, 점도지수 향상제(Viscosity Index Improver)의 폴리머 종류에 따라 전체 운전 조건에서 연비에 대한 유의성을 보이지 않았으며, 이는 2종의 점도지수 향상제가 모두 Polymethacrylate 계로써 성분이 유사한 것에 기인한 것으로

Table 6. F-value and P-value and R-square for total fuel consumption as a result of 1st seq. VID test

F, P and R ² for total fuel consumption of stage1~stage6			
	F	P	R ²
CCS	0.49	0.56	
HTHS	10.15	0.09	
FM	10.61	0.08	92.2%
SSI	0.04	0.86	
VII	2.20	0.28	

보인다.

반면 고온고전단점도(High Temperature High Shear viscosity)와 마찰조정제(Friction Modifier)는 상대적으로 높은 F-value와 낮은 p-value를 보여, 제동연료 소비율에 대해 상당히 높은 유효성을 갖는 인자로 확인할 수 있었다. 또한 점도지수 향상제의 전단안정성 지수(Shear Stability Index)는 고회전 조건에서 높은 F-value를 보여, 연비 상관성에 대한 추가 확인이 필요한 것으로 나타났다.

일부실시험에 따른 분석결과, 유효한 윤활 인자로 선정된 3종(고온고전단점도, 마찰조정제, 점도지수향상제의 전단안정성)에 대한 추가 검증 및 최적의 엔진오일 배합 조건을 선정하기 위해, 요인배치법에 따라 2차 연비시험(Sequence-VID)을 실시하였으며, 시험 결과

Table 5. F-value and P-value and R-square for BSFC of parameters as a result of 1st seq. VID test

		Stage(Test condition)						
		1	2	3	4	5	6	7
F	CCS	1.20	0.17	0.10	0.11	2.62	0.15	0.91
	HTHS	13.8	3.22	5.34	7.27	2.29	6.65	45.3
	FM	9.51	1.55	8.36	15.39	0.06	7.72	6.66
	SSI	0.04	0.52	0.09	0.11	1.08	0.37	34.4
	VII	1.48	2.93	2.07	1.53	0.99	0.96	13.1
P	CCS	0.39	0.72	0.78	0.78	0.25	0.74	0.44
	HTHS	0.07	0.22	0.15	0.11	0.27	0.12	0.02
	FM	0.09	0.34	0.10	0.06	0.83	0.11	0.12
	SSI	0.85	0.55	0.79	0.77	0.41	0.61	0.03
	VII	0.35	0.23	0.29	0.34	0.43	0.43	0.07
R ² , %		92.9	80.8	88.9	92.4	77.9	88.8	98.0

Table 7. Fuel economy of candidates depending on stages

		Fuel economy (BSFC, kg/kwh)			
		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
HTHS		2.6	2.6	2.6	2.6
FM		O	O	X	X
SSI		Low	High	Low	High
Stage	1	0.24149	0.24057	0.24194	0.24092
	2	0.25114	0.25071	0.25079	0.25030
	3	0.24412	0.24339	0.24478	0.24388
	4	0.45940	0.46208	0.46824	0.46775
	5	0.55686	0.56619	0.55876	0.56870
	6	0.31975	0.31872	0.32311	0.31976
	7	0.26331	0.26154	0.26278	0.26104

		Fuel economy (BSFC, kg/kwh)			
		Case-5	Case-6	Case-7	Case-8
HTHS		3.5	3.5	3.5	3.5
FM		O	O	X	X
SSI		Low	High	Low	High
Stage	1	0.24319	0.24236	0.24365	0.24314
	2	0.25278	0.25157	0.25228	0.25203
	3	0.24573	0.24476	0.24695	0.24493
	4	0.46639	0.46673	0.47472	0.47527
	5	0.57609	0.56008	0.56224	0.57901
	6	0.32280	0.32208	0.32621	0.32559
	7	0.26380	0.26254	0.26572	0.26369

Table 8. F-value and P-value and R-square for BSFC of parameters as a result of 2nd seq. VID test

		Stage (Test condition)						
		1	2	3	4	5	6	7
F	HTHS	285.0	48.63	37.04	95.89	1.16	35.74	11.03
	FM	21.53	0.96	6.15	143.5	0.14	19.42	0.93
	SSI	56.25	8.49	20.44	1.40	0.64	4.95	10.24
P	HTHS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.03
	FM	0.01	0.38	0.07	0.00	0.72	0.01	0.39
	SSI	0.00	0.04	0.01	0.30	0.47	0.09	0.03
R ² , %		98.1	88.72	89.7	97.1	0.00	89.1	73.3

및 이에 대한 분산분석 결과를 Table 7~Table 9에 나타내었다.

2차 연비 시험결과에 대한 분석분석 결과, Stage별

고온고전단점도 및 마찰조정제의 제동연료 소비율에 대한 유효성이 1차 연비시험의 분산 분석 결과와 유사한 경향으로 나타났다. 고온고전단 점도는 Stage 5를

Table 9. F-value and P-value and R-square for total fuel consumption as a result of 2nd seq. VID test

F,P and R ² for Total fuel consumption of Stage1~Stage6			
	F	P	R ²
HTHS	419.88	0.00	98.82%
FM	81.54	0.00	
SSI	90.23	0.00	

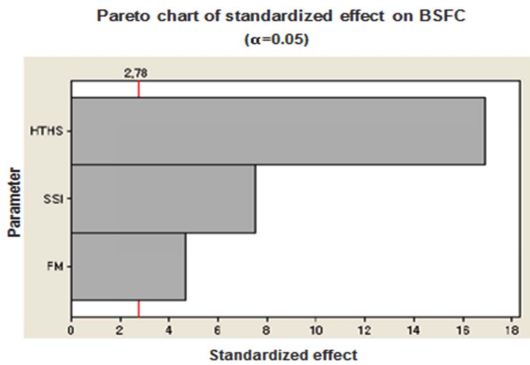


Fig. 7. Pareto chart for stage 1.

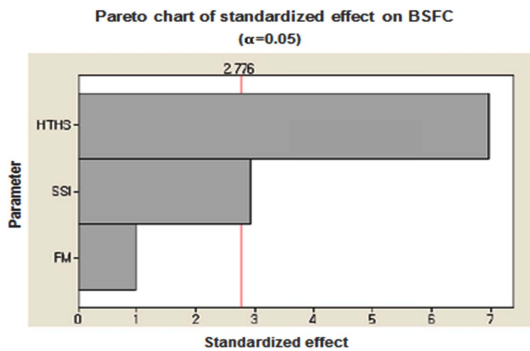


Fig. 8. Pareto chart for stage 2.

제외한 대부분의 운전조건(경계운할, 혼합운할)에서 제동연료소비율에 유효하게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 마찰 조정제는 혼합운할에서 제동연료소비율 저감에 효과가 있으나, 경계운할 영역(Stage 4, 6)에서 더 유효한 것으로 나타났다. 반면, 점도지수 향상제의 전단안정성은 Sequence VID 운전조건 중 경계운할이 지배적인 Stage 4, Stage 6을 제외한 고속의 혼합운할 영역(Stage 1~3, Stage 7)에서 그 유효성이 나타났으며, 요인분석 결과(Fig. 7~14)인 Pareto chart 또한 분산분석 결과와 동일한 경향성을 보였다. Pareto chart

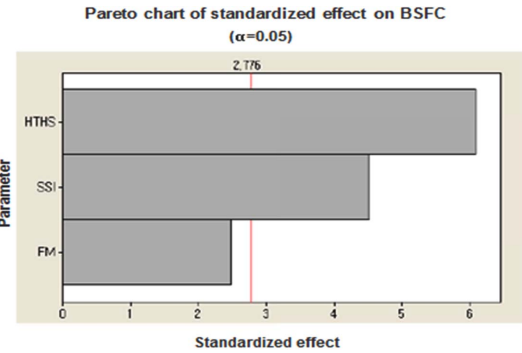


Fig. 9. Pareto chart for stage 3.

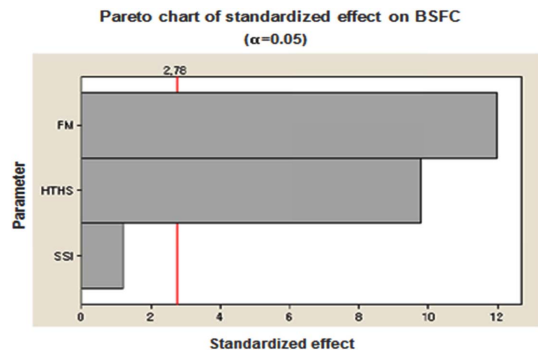


Fig. 10. Pareto chart for stage 4.

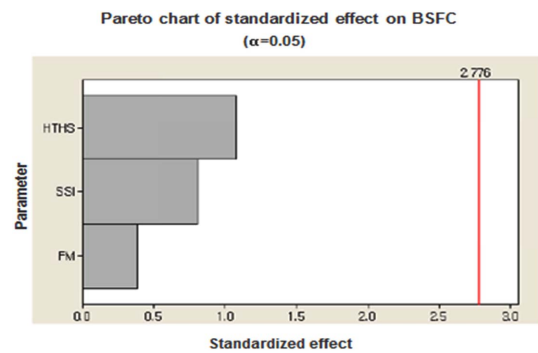


Fig. 11. Pareto chart for stage 5.

는 통계적 유의 수준($\alpha=0.05$)을 기준으로 인자간 유효 수준을 나타낸 히스토그램으로, 기준선 보다 수치가 클 수록 그 인자의 유효성 또한 크다고 할 수 있다.

유체운할이 가장 우세한 Stage 5의 경우, 점도가 가장 유효한 인자로 예상되나, 분산분석 결과의 F-value, P-value 및 R²를 고려할 경우, 본 영역에서 인자간 통계적 유효성 비교가 어려운 것으로 나타났다.

2차 Sequence VID시험결과에 있어서, 각 운전 조건

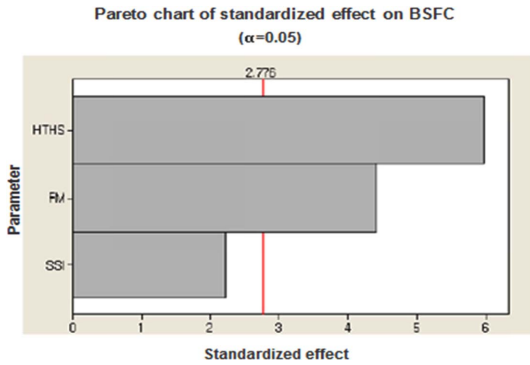


Fig. 12. Pareto chart for stage 6.

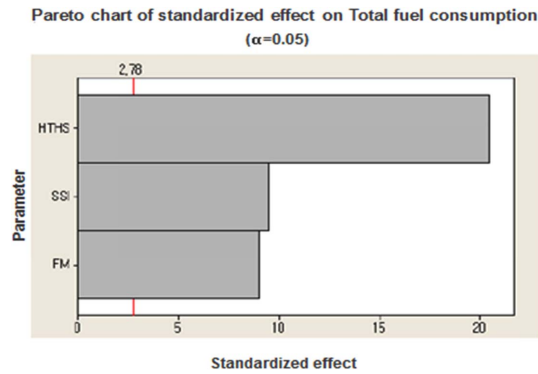


Fig. 14. Pareto chart for total fuel consumption (stage 1~6).

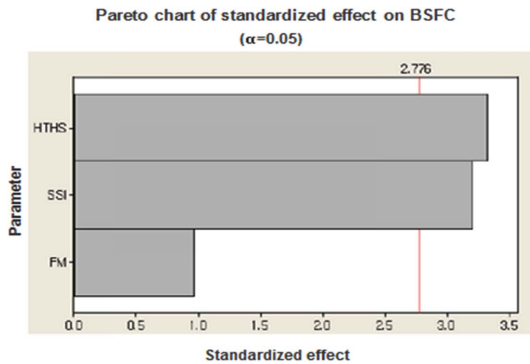


Fig. 13. Pareto chart for stage 7.

(Stage)에 대해 인자별 수준에 따른 연비개선율(평균 제동연료소비율 차이)을 Table 10에 표시하였다. 연비개선율은 각 인자 수준의 제동연료소비율 데이터 평균(4개 평균)에 대한 상대적 비교치이며, 상기 분산분석 및 요인분석 결과와 동일한 경향을 보임을 알 수 있다.

고온고전단점도는 엔진오일이 저온조건(45°C)인 Stage 5를 제외한 운전조건에서, 2.6 cP인 엔진오일이 3.5 cP 제품 대비 약 0.6~1.4%의 연비개선 효과가 있으며, 엔진오일 온도가 높은 영역에서 그 효과가 큰 것으로 나타나, 경계유효 및 혼합유효 영역에 걸쳐 마찰저감 효과가 있는 것으로 확인되었다.

마찰조정제는 엔진회전수가 낮은 Stage 4, 6의 저속 조건에서 효과가 있으며, 폴리브덴디티오카바메이트를 마찰조정제로 사용시, 사용하지 않은 경우 대비 0.9~1.7%의 개선 효과를 보여 경계유효에서 마찰 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

점도지수향상제의 전단안정성은 고속조건에서 전단 안정성지수가 높을수록 연비개선 효과가 큰 것으로 나타났다으며, 이는 점도지수향상제인 Polymer의 분자량(Molecular weight)이 클수록 또는 분자구조상 Polymer Chain이 길수록 전단안정성지수가 높아지는데 이에 따른 고속, 고온에서의 일시적 Shear thinning 효과가 증대하여 고온고전단점도가 낮아지는 것에 기인함을 보여준다. 단, 장시간 운전 시 Polymer의 파괴에 의한 영구 점도저하 및 산화생성물에 의한 엔진오일의 성능 저하를 고려할 경우, 상기 효과는 제한적일 것으로 판단된다.

Sequence-VID 시험법에 준하여 Stage 1~6의 제동 연료소비율에 가중치를 감안한 인자 수준 별 총연료소비량(Total fuel consumption) 비교를 Table 11과 Fig. 15에 표시하였다.

Table 11의 연비 개선율은 Stage별 Weight factor가

Table 10. Summary of fuel economy (BSFC) improvement depending on parameters

Stage	Fuel economy (BSFC)						
	1	2	3	4	5	6	7
HTHS, % 2.6 vs 3.5	0.77	0.57	0.63	1.38	-	1.20	0.67
FM, % 0 vs 700 ppm	0.21	-	-	1.69	-	0.88	-
SSI, % Low vs High	0.34	0.24	0.47	-	-	-	0.65

Table 11. Improvement of fuel economy for Total fuel consumption of parameters

	Total fuel consumption for stage1~6
	Improvement, %
HTHS (2.6 vs 3.5 cP)	0.78
FM (700 vs 0 ppm)	0.34
SSI (High vs Low)	0.36

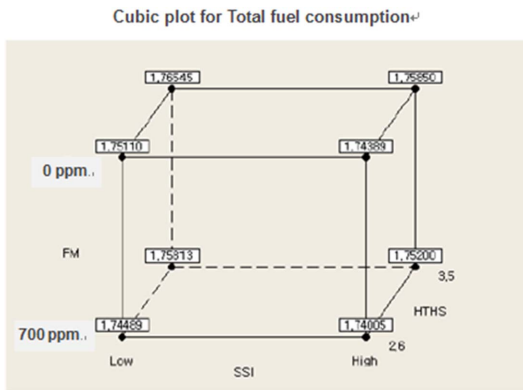


Fig. 15. Cube plot for total fuel consumption of stage 1~6.

상이하어, 특정 운전조건에서의 인자간 비교는 어려우나, Sequence-VID 전 운전조건에 걸쳐 고온 고전단점도, 마찰조정제 및 전단안정성이 연비와 상관성이 있으며, 그 중 고온고전단점도가 가장 효과가 큰 것을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 15의 8가지 조합 중, 총 연료소모량이 가장 적은 조합인 고온고전단점도 2.6 cP/마찰조정제 700 ppm 첨가/고전단점도 점도지수 향상제를 사용한 엔진오일은 연료소모량이 가장 많은 조합 고온고전단점도 3.5 cP/마찰조정제 미첨가/저전단점도 점도지수향상제를 사용한 것보다 연료소모량이 1.48% 개선됨을 알 수 있다.

5. 결 론

자동차용 엔진오일에서 윤활인자별 연비와의 상관성을 확인하기 위해, 엔진동력계에 의한 연비 시험을 실

시한 결과는 다음과 같다.

첫째, 5가지 윤활인자(저온점도, 고온고전단점도, 마찰조정제, 점도지수향상제의 전단안정성, 폴리머의 종류)중, 고온고전단점도가 연비개선 효과가 가장 크고 대부분의 윤활영역에서 효과가 있는 것으로 확인되었다.

둘째, 마찰조정제는 혼합윤활 및 경계윤활 영역에서 연비개선 효과가 있으며, 특히 경계 윤활에서 그 효과가 두드러지게 나타나는 것으로 확인되었다.

셋째, 점도지수향상제의 전단안정성인자는 고온 고전단점도, 마찰조정제 인자 대비 효과를 나타내는 윤활영역이 다소 제한적이며, 고속 운전조건과 같이 일시적 전단에 의한 Shear-thinning 효과가 큰 영역에서 연비개선 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

결과적으로 마찰조정제와 전단안정성지수가 큰 점도지수향상제를 사용하며 고온고전단점도가 낮은 엔진오일이 엔진 내 접촉부위의 마찰을 저감시키고, 엔진오일의 유동 저항을 적게하여 연비 개선 효과에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

단, 전단안정성지수가 큰 점도지수향상제를 사용 시 영구전단에 의한 내구성능 악화가 우려되므로 연비향상과 내구성능 보완의 적절한 균형을 유지할 수 있는 점도지수향상제를 선택하는 것이 중요하다.

References

- [1] Lee, Y. J., Kim, G. C., Pyo, Y. D. "Automotive Engine Oil and Vehicle Fuel Economy", 32nd Proc. Conference of the Korean Society of Tribologists and, Lubrication Engineers, pp. 155-161, November 2000.
- [2] Bae, D. Y., Yoo, S. C., Cho, J. H. "Friction Characteristics of Gasoline Engine Oil Additives in Boundary Lubrication", Proceedings of KSAE Conference, Vol. 1, pp. 103-109, October 2004.
- [3] Ushioda, N., Miller, T. W., Sims, C. B., Parsons, G., and Sztenderowicz, M., "Effect of Low Viscosity Passenger Car Motor Oils on Fuel Economy Engine Tests", SAE Paper 2013-01-2606.
- [4] Young, J. A. "Infrared Spectroscopic Investigation of Lubricants under Shear", *J. Korean Soc. Tribol. Lubr. Eng.*, Vol. 3, No. 2, 1987.
- [5] Takeshi, Y., "Enhancement Technology of Viscosity Index Improver in Low Viscosity Lubricants", *Tribologist*, Vol. 53, No.7, November 2007.