

엔진 및 차량냉각계의 냉각수유량 측정실험 및 계산방법에 관한 연구

A Study of the Experiment and the Calculation Method on the Coolant Flow Rate of Engine and Vehicle Cooling System

오 창 석*, 유 택 용*, 이 은 현*, 최 재 권**
Changseok Oh, Taekyong Ryu, Eunhyun Lee, Jaekwon Choi

Abstract

In this study, the prediction method of coolant flow rates has been developed and applied to an engine and vehicle cooling system. The flow rate passing through each component of the system is very important parameter to evaluate the heat transfer process from the combustion gas to the coolant and the heat rejection process from the radiator/heater to the ambient air. However, the present study reveals that the measurement using the flowmeter fails to give practical flow rates due to its additive resistance. In contrast, the present method which uses the parallel and serial relationship of flow resistance proved to be a good tool to predict the real flow rates. It can be also used to design the cooling system in the incipient stage of engine/vehicle development. The procedure was coded to the computer program so as to use it flexibly and, in the future, to expand it into an independent design tool of the whole cooling system including the heat release and rejection.

주요기술용어 : Cooling System(냉각계), Coolant Flow Rate(냉각수 유량), Flowmeter(유량계), Flow Resistance(유동저항), Heat Rejection(열방산)

Nomenclature

ζ : Flow resistance [$\text{mH}_2\text{O}/(\ell/\text{min})^2$]
 ΔP : Head [mH_2O]
 Q : Flow rate [ℓ/min]

1. 서 론

냉각은 크게 수열관점에서의 엔진냉각계와 방열관점에서의 차량냉각계로 대별할 수 있다. 수열관점에서의 엔진냉각은 열부하저감에 의한 내구성확보, 노크억제를 통한 성능개선, 워-업(Warm-Up) 시간단축에 의한 유해가스배출저감 등을 그 목적으로 함에 비해, 방열관점에서의 차량냉각은

* 현대자동차 선행연구소

** 정회원, 현대자동차

과열방지를 통한 내구성확보와 과냉방지를 통한 연비개선 그리고 히터성능과 성에제거기능 등을 그 주목적으로 하고 있다.¹⁾

이를 단순히 열흐름의 입장에서 보면, 연소실에서 연소된 연료에너지의 일부가 피스톤의 변위 변화와 함께 기계적 에너지로 바뀌어 자동차를 구동시키며, 이 과정에서 발생된 열의 일부는 실린더블록, 헤드, 피스톤 등으로 전열되고 남은 에너지는 배기가스와 함께 배출된다. 수열관점에서의 엔진냉각이 엔진블록과 헤드에서의 냉각수의 유동특성을 개선하여 배기포트사이나 점화플러그와 배기포트사이와 같이 열부하가 심한 부분의 열부하저감에 주목적이 있다면,²⁾ 방열관점에서의 라디에이터 성능은 엔진의 실린더블록과 실린더헤드 등에서 냉각수로 전열된 열의 효과적인 방열에 주안점을 두고 있다.³⁾ 이러한 수열 및 방열과정의 해석에서 중요한 인자중 하나는 엔진 및 차량 냉각계의 각 구성요소 즉, 실린더블록/헤드 및 라디에이터, 히터, 쓰로틀바디 등을 통과하는 유량에 대한 정보이다. 이 유량에 대한 정보를 얻기 위해서는 시험을 통하여 직접 측정하는 방법이 사용되고 있는데 이에 는 두가지 문제점이 있다. 첫 번째는 실측을 하기 위해서는 냉각시스템전체가 구성되어야 한다는 것이다. 이는 제품이 출하되기 전 설계과정에서는 이 데이터를 확보하기가 곤란하다는 것을 의미한다. 둘째는 유량을 측정하기 위해서는 측정하고자하는 구성요소에 직렬로 유량계를 연결하여야 하는데 이 경우 이의 부가적 저항 때문에 실제로 흐르는 유량을 측정하기 곤란하며, 이 경우 유량계의 설치가 실제 유량에 어느 정도의 영향을 미치는지에 대한 추가적인 시험이 필요하게 된다. 이에 덧붙여 유량은 엔진속도, 써모스탯의 개폐여부에 따라 변하기 때문에 원하는 엔진상태마다 이를 전부 측정하여야만 한다.

본 논문에서는 완전히 해석적인 방법만으로 냉각계를 구성할 수 있는 설계방법의 시작단계로서 해석적 방법에 기반을 둔 냉각계 유량예측방법에 관한 연구를 수행하였다. 이 예측방법은 컴퓨터프로그램으로도 작성되었으며 이를 이용한 계산결과를 실

험치와 비교하여 이 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험은 우선 해당 엔진 물펌프를 이용하여 물 펌프성능시험을 수행하였다. 물펌프성능시험은 물 펌프 입출구에 압력계를 장착하고 출구쪽 압력계 이후에 유량계를 설치한후 자동조절밸브를 연결하고 이를 수조에 연결하였다. 또한, 물펌프입구 쪽 압력계는 수조의 아래출구쪽과 연결되었다. 실험에 사용된 센서류의 명세는 Table 1과 같으며, 이 실험장치의 구성도는 Fig.1과 같다.

Table 1 Sensor specification

센서종류	제 품 명	측 정 범 위
유량계	EG&G FT-20	3.8~378(ℓ/min)
압력계	SENSOTEC TJE-25	0~25 (PSIA)
	SENSOTEC TJE-100	0~100 (PSIG)

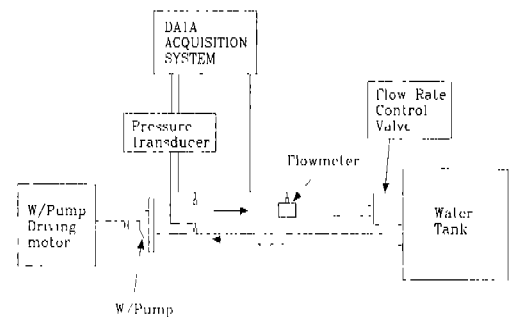


Fig.1 Schematics of experimental setup

실험은 유량조절밸브를 완전히 연 상태에서부터 조금씩 밸브를 닫아가며 완전히 닫은 상태까지 유량과 물펌프 입출구의 수두차를 측정하면서 진행되었으며 물펌프속도는 1000RPM에서부터 6000RPM까지 1000RPM씩 증가시켜가며 반복되었다.

이 실험결과, 각 엔진 수두차로 이루어진 Fig.2와 같은 물펌프 성능그래프를 얻을 수 있었다.

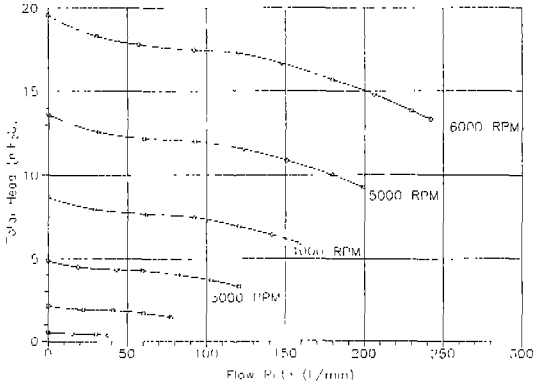


Fig.2 W/Pump performance graph

두 번째로는 냉각계를 구성하는 각 구성요소들의 유동저항을 측정하는 것이다. 이 실험또한 앞서 물펌프성능시험장치를 그대로 사용하였으며, 차이점은 압력계를 측정하고자하는 각 구성요소의 냉각수 입출구에 위치시킨 것이며 유량계는 출구쪽 압력계이후에 설치하여 유량계의 저항이 측정하고자하는 대상물의 저항에 포함되지 않도록 하였다. 이 시험을 통하여 엔진, 라디에이터, 히터들을 통과하는 유량과 이때 각 구성요소의 입출구의 압력을 측정하여 유동저항을 계산하였으며, 써모스탯(Thermostat)의 개폐 여부에 따른 써모스탯하우징(Thermostat Housing)의 저항도 계산하였다. 유동저항은 참고문헌⁴⁾에서와 같이 측정수두차를 측정유량의 제곱으로 나눈 다음 식 (1)로 정의하여 사용하였다.

$$\zeta = \frac{\Delta P}{Q^2} \quad (\text{mH}_2\text{O}/(\text{l}/\text{min})^2) \quad (1)$$

또한, 써모스탯하우징내 영구우회구멍(Permanent By-Pass Hole)의 저항은 저항의 병렬회로관계에 관한 식 (3)으로부터 구하였다.

이 실험은 현대자동차에서 개발한 1.5 l 급 MPI 엔진에 대해서 수행되었으며, 제원은 Table 2에 나타나 있다.

Table 2 Specifications of Test Engine

Type	14
Stroke Volume(cc)	1,495
Bore(mm)×Stroke(mm)	75.5×83.5
Compression Ratio	10
Valve Mechanism	DOHC

3. 계산방법

유량계산은 실험을 통하여 측정된 각 구성요소의 저항값을 다음과 같은 직렬 및 병렬회로 관계식을 이용하여 구하였다.

$$\zeta_{\Sigma} = \zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n = \sum_{i=1}^n \zeta_i \quad (2)$$

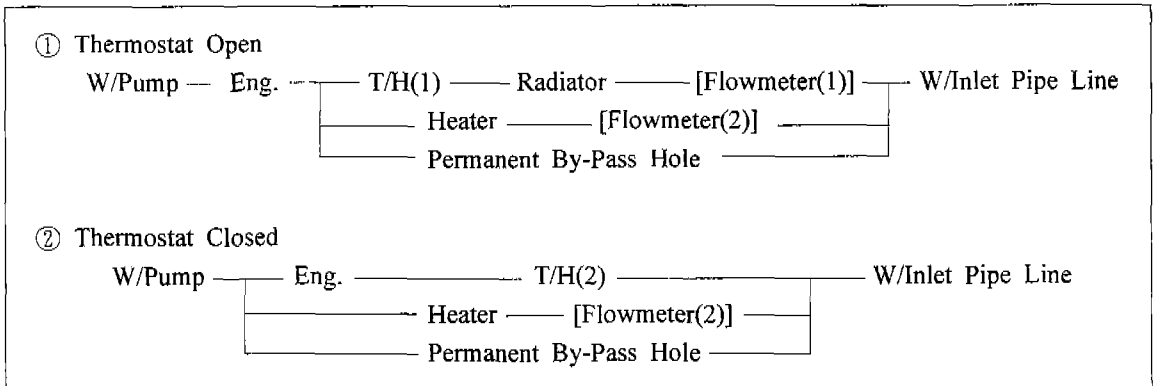


Fig.3 Schematics of Cooling System

$$\frac{1}{\sqrt{\xi_{\Sigma}}} = \frac{1}{\sqrt{\xi_1}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{\xi_n}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\xi_i}} \quad (3)$$

식 (2)는 직렬회로의 경우이며 식 (3)은 병렬회로에 대한 관계식이다. Fig.3의 냉각계회로도에서 식 (2)와 (3)을 이용하면 전체저항을 계산할 수 있으며, 계산된 전체저항을 ξ_{TOTAL} 이라하면, 전체저항곡선식은 다음과 같게 된다.

$$\Delta P = \xi_{TOTAL} \cdot Q^2 \quad (4)$$

예를 들어 써모스탯이 닫혀있는 경우의 전체저항은 아래에 표현된 과정을 통하여 구할 수 있다.

$$\xi_{TOTAL} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3$$

여기서,

$$\xi_1 = \xi_{eng.}, \quad \xi_3 = \xi_{W/Inlet Hpe}$$

$$\xi_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{\xi_{21}}} + \frac{1}{\sqrt{\xi_{22}}} + \frac{1}{\sqrt{\xi_{23}}} \right)^{-2}$$

$$\xi_{21} = \xi_{T/H(2)}, \quad \xi_{23} = \xi_{Permanent \text{ By-pass Hole}}$$

$$\xi_{22} = \xi_{Heater} + \xi_{Flowmeter(2)}$$

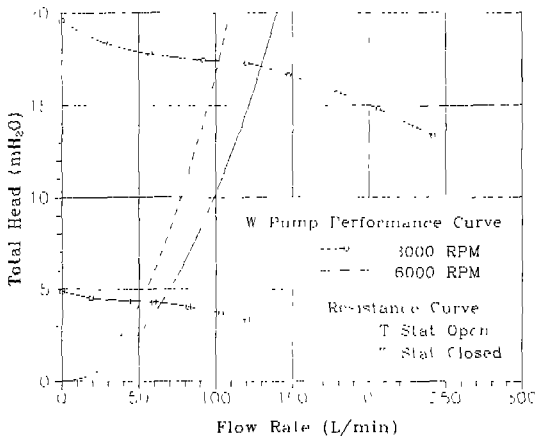


Fig.4 W/Pump Performance Curve and Total Resistance Curve

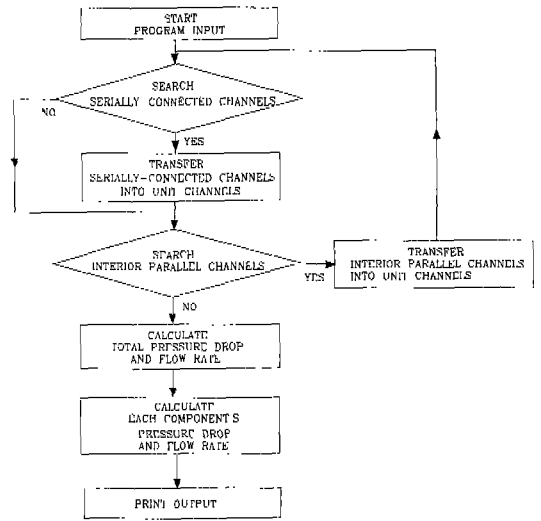


Fig.5 Calculation Flow Chart

이 전체저항곡선과 Fig.2의 물펌프성능곡선의 교차점이 각 물펌프회전속도에서의 작동점이 된다. Fig.4은 물펌프속도 3000 및 6000RPM에서 써모스탯이 완전히 열린 경우와 닫힌 경우의 작동점을 나타내고 있다.

식 (4)의 전체저항곡선식과 물펌프성능곡선의 교차점으로부터 작동점을 찾게 되면 시스템전체에서의 수두차와 유량을 알 수 있게 되고 직렬회로에서 각 구성요소의 수두차를 계산한후 식 (1)로부터 유량을 계산할 수 있다. 계산에 필요한 흐름도는 Fig.5와 같으며 자세한 계산과정은 부록1에 서술하였다.

4. 실험 및 계산결과와 검토

실험결과 냉각계 각 구성요소의 유동저항은 Table 3과 같으며, 이중에서 T/H(1)은 써모스탯이 완전히 열린 상태에서 써모스탯하우징의 유동저항이며, T/H(2)는 써모스탯이 완전히 닫혀 라디에이터를 통과하는 유량이 없는 상태에서 써모스탯하우징을 통과하는 유동저항을 의미한다. Fig. 3에서 괄호[]로 묶은 구성요소는 실험을 위하여 부가적으로 실차상태냉각계에 설치한 유량계를 의미하

며, 유량계(1)과 유량계(2)는 각각 라디에이터 및 히터를 통과하는 유량을 측정하기 위한 것이다.

Table 3 Measured Flow Resistance of Each Component

저항값단위[$10^{-4} \text{ mH}_2\text{O}/(\text{l}/\text{min})^2$]

부 품 명	측정저항값
Eng.(BLK+GSK+HD)	A
Radiator	B
Heater	24B
T/H(1)	C
T/H(2)	8.3C
Flowmeter(1)	1.45
Flowmeter(2)	28.5
W/Inlet Line	D
Permanent By-Pass Hole	E

(주) 측정저항값중 A, B, C, D, E는 현대자동차 대외비로 비공개함.

Table 4(a) Flow Rate(Thermostat open)

물펌프 속도 (RPM)	Qrad (l/min)			QHTR (l/min)		
	실측	계산	오차 (%)	실측	계산	오차 (%)
3000	45.0	46.7	3.8	13.5	13.7	1.5
4000	60.3	62.3	3.3	18.2	18.3	0.5
5000	75.7	78.0	3.0	22.8	22.9	0.4
6000	90.8	93.8	3.3	27.4	27.5	0.4

Table 4(b) Flow Rate(Thermostat closed)

물펌프 속도(RPM)	QHTR (l/min)		
	실측치	계산치	오차(%)
3000	17.9	16.9	-5.6
4000	24.3	22.5	-7.4
5000	29.8	28.3	-5.0

Fig.3과 같이 실차상태냉각계에서 라디에이터와

히터유량측정용 유량계를 설치하였을 때 측정된 유량의 결과와 Table 3의 각 구성요소들의 유동저항값을 이용하여 부록 1에 설명한 방법에 의한 계산치와 비교한 결과를 Table 4에 정리하였다.

실측값과 계산값사이의 오차는 써모스탯 개변시 약 3~4%수준이며, 폐변시 평균오차는 약 6%수준이었다. 또한, 이 오차율을 적용하여 유량계 탈거시 예측유량을 계산한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5 Calculated Flow Rate(Flowmeter uninstalled)

물펌프속도 (RPM)	T/Stat Open		T/Stat Close
	Qrad (l/min)	QHTR (l/min)	QHTR (l/min)
3000	46.3	15.0	20.8
6000	93.4	30.4	

써모스탯 개변시 유량계탈거로 증가되는 유량 비율은 라디에이터 통과유량이 약 3%, 히터로는 약 11% 증가하는 것으로 예측되었다. 또한, 써모스탯 폐변시 히터통과유량은 약 16% 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 써모스탯 폐변시 히터 통과 유량은 히터성능 및 성에 제거 성능과 밀접한 관계가 있기 때문에 이 유량값은 매우 중요한데, 계산결과 실차상태에서 유량계로 측정된 결과와는 무시할 수 없는 차이가 발생하기 때문에 히터성능 예측을 위해서는 앞서 제시한 방법과 같은 해석적 방법을 통하여 실제로 흐르는 유량을 평가하는 방법이 꼭 필요하게 된다.

5. 결 론

자동차엔진 및 차량냉각계의 각 구성부품을 통과하는 냉각수유량예측은 내구성확보차원의 수열관점과 과열, 과냉방지의 방열관점에서 모두 매우 중요한 설계고려인자이다. 본 논문에서는 실험 및 해석적 방법을 통하여 유량을 측정, 예측하는 방법에 관한 연구를 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 자동차냉각계의 냉각수유량을 예측함에 있어서 각 구성부품저항에 대한 실험결과로부터 냉각계회로도를 구성하면, 기본적인 저항 관계식으로부터 설계시 오차허용수준인 한 자리수이내의 오차를 만족시키는 결과를 얻을 수 있다.
- 2) 유량계장착시 측정유량은 유량계가 장착되지 않는 실차상태에서의 유량과는 히터의 경우 본 실험조건에서 약 16%차이가 났다. 이와 같이 유량계가 설치되지 않는 실제 경우의 유량을 얻기 위해서는 회로도를 구성하여 유량을 평가하는 방법이 필수적이다.
- 3) 각 구성요소들의 저항에 대한 적절한 자료를 이용하여 설계단계에서부터 이 방법을 적용하면 최적설계를 위한 설계과정을 크게 단축시킬 수 있다.
- 4) 냉각계유량계산을 위한 알고리즘을 구성하여 이를 컴퓨터프로그램으로 작성하였으며 이 프로그램을 이용하여 신속, 정확히 유량을 계산할 수 있었다.
- 5) 이 유량계산프로그램을 라디에이터, 히터 등에서의 방열과정해석방법 및 엔진에서의 수열과정해석방법과 연결하여 통합운영하면 독자적인 냉각계 설계도구를 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 류택용, 신승용, 이은현, 최재권, "가솔린 엔진에서의 냉각수로의 전열량에 대한 연구", 자동차공학회지, Vol. 5, No. 6, 1997.
2. 민병순, 최재권, "엔진내 냉각수 유동형태가 연소실 벽면온도에 미치는 영향에 관한 연구", 자동차공학회논문집, Vol. 1, No. 1, 1993.
3. Emmenthal, K. D. and Huch, W. H., "A Rational Approach to Automotive Radiator Systems Design", SAE 740089.
4. 屋満, "자동차의 열관리입문", 山海堂, pp. 76~78, 1979.

부 록 1. 냉각계 저항계산방법

엔진 및 차량냉각계는 여러 구성요소들이 직렬 또는 병렬로 연결된 폐회로를 구성하고 있다. 냉각수가 이 냉각시스템을 순환하도록 하는 구동에너지는 크랭크축과 벨트로 연결되어 회전하는 물펌프의 회전에너지를 이용하여 냉각수에 운동에너지를 부여한 후 물펌프의 벨류트(Volute)에서 압력에너지로 변환되어 발생한다. 이렇게 물펌프 출구에서 상승된 압력은 엔진 및 차량냉각계의 저항을 이기며 흐르면서 감소하게 되고 마침내 다시 물펌프에서 압력에너지를 회복한 후 다시 냉각계를 통과하는 과정을 반복하게 된다. 따라서, 이 냉각시스템의 전체유량은 물펌프의 성능과 물펌프를 제외한 시스템의 전체저항에 의해서 결정된다. 또한, 각 구성요소를 통과하는 유량은 그 구성요소의 입출구에 걸리는 압력차와 자체유동저항에 의해서 결정된다.

이 계산과정을 다음의 예제를 들어 설명하면 다음과 같다.

- a. 시스템회로도상에 단순히 직렬로만 연결되어 있는 구성요소들의 저항을 식(2)를 이용하여 단일 채널들로 바꾸어 준다(과정①).
- b. 병렬회로중 내부병렬회로를 검색한후 식(3)을 이용하여 단일 채널들로 변환한다(과정②). 내부병렬회로검색은 해당 병렬회로를 단락시켰을 때 새로운 외부노드의 존재여부로 판단한다. 여기서 노드(Node)라함은 각 구성요소의 입출구를 의미하며, 각 구성요소를 저항으로 표시하였을 때 각 저항들의 연결점이 된다.
- c. 다시 직렬연결 채널이 있는지 검색한후 발견시 단일 채널들로 바꾼다(과정③). 내부병렬회로가 존재하는지 검색한후 발견시 과정b로 간다(과정④,⑤). 없으시 다음 단계로 넘어 간다.
- d. 최종적으로 병렬회로들을 직렬회로로 바꾸어 준다(과정⑥).

e. 단일 직렬회로를 구성하여 전체 저항을 구한다(과정⑦).

f. 전체저항과 식(4), Fig.2로부터 작동점을 구하여 이로부터 전체수두차와 유량을 얻을 수 있다. 각 구성요소를 통과하는 유량과 수두차는 과정 a-e의 역과정을 통하여 계산한다.

본 연구에서는 위에 서술된 과정 a-f를 컴퓨터 프로그램으로 작성하여 본 연구에 이용하였다.

