

<기술논문>

자동차 트랜스미션 스타터-제너레이터의 수학적 모델 개발

장 봉 춘^{*1)} · Dean C. Karnopp²⁾

안동대학교 기계공학부¹⁾ · University of California at Davis²⁾

A Mathematical Model Development of Automotive Transmission Starter-Generator

BongChoon Jang^{*1)} · Dean C. Karnopp²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Gyeongsbuk 760-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, University of California at Davis, 2132 Bainer Hall, Davis, CA 95616, U.S.A.

(Received 20 June 2005 / Accepted 2 November 2005)

Abstract : The proposed mathematical model of the starter-generator system incorporates the motor speed, battery voltage and the desired current to estimate the moment generation capabilities of the starter-generator and the actual current of the battery system. The fundamentals for this mathematical modeling are the simulated results of the experimental data. These pertinent data are used in establishing the governing equations for the determination of motor moments, actual battery currents and efficiencies of the system's operation at different loading characteristics and speed regions. The derived equations will be used into simulation programs to predict the fuel efficiency, vehicle characteristics of a hybrid electric vehicle equipped with a transmission starter-generator which will be developed.

Key words : Starter-generator(스타터-제너레이터), Motor speed(모터속도), Battery voltage(배터리전압), Battery current(배터리전류), Efficiency(효율), Motor moment(모터모멘트)

1. 서 론

자동차들은 교류발전기(Alternator)와 별개의 스타터 모터에 의해 구동되는 엔진을 가진 14볼트 전기 시스템(흔히 말하는 12볼트 시스템)을 이용한다. 현재의 전기 시스템은 라디오, 기타 자동 창문들이나 여타 편의시설들을 위한 50여 개까지의 모터들을 위한 에너지를 제공하는 능력을 가지고 있다. 그러나 이러한 전기 시스템은 불충분한 배터리 충전율을 가지고 특히 추운 겨울에 필요한 에너지를 위해 요구되는 동력을 제공하지 못할 수 있다. 그래서 많은 자동차 업체들이 초저온시동/냉동시동(Cold

Start)¹⁾에 관한 연구를 수행해왔다. 이러한 큰 동력을 요구하는 문제는 독일계 한 부품회사(Sachs)에서 제공하는 DynaStart²⁾라는 시스템의 소개로 해결된다(Fig. 1). DynaStart는 엔진과 트랜스미션 사이의 크랭크샤프트위에 올려지는 스타터-제너레이터(Starter-Generator) 시스템이다. 이는 Transmission Starter-Generator(TSG)라는 시스템으로 명칭되고 42볼트 시스템^{3,7)}과 함께 소개되었다. 다임러크라이슬러는 이러한 DynaStart(유럽명)/TSG(미국명) 시스템을 고급차(예로, Mercedes Benz)에 장착하여 상용화할 것으로 판단된다.

개발된 TSG 시스템을 전체 차량의 시물레이션에 적용하기 위해서 먼저 TSG 시스템의 작동 파라미터들을 잘 묘사할 수 있는 수학적 모델의 개발을 요

*To whom correspondence should be addressed.
bjang@andong.ac.kr

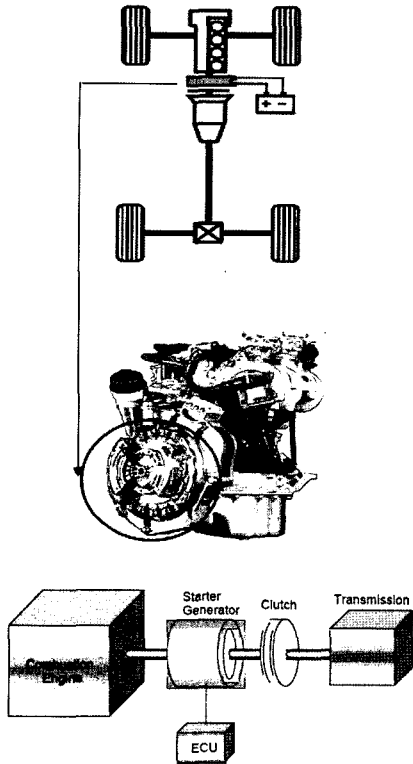


Fig. 1 Schematic of TSG2) System and 42 volt

구한다. 본 연구에 나타난 42볼트 배터리 시스템과 TSG의 수학적 모델은 모터의 속도, 배터리 전압, 발생된 모터 모멘트와 실제 배터리 전류를 평가하기 위해 요구되는 전류로 표현된다. 본 연구의 목적은 다임러크라이슬러의 가솔린 엔진과 트랜스미션 사이에 설치될 Sachs의 시동기 제너레이터 시스템(TSG)의 결합 후 다임러크라이슬러의 실험 결과를 바탕으로 curve fitting 기법을 이용하여 수학적 모델을 유도하고자 한다. 이러한 개발될 수학적 모델은 기존의 초저온시동 능력 예측을 위한 연구⁸⁾에서 실험데이터가 도표로서 시뮬레이션에 사용되었으나, 간단한 수학적 모델을 이용함으로써 시뮬레이션 시간 단축에 도움이 될 것이다.

2. 실험 데이터

Fig. 1과 같은 프로토타입의 시스템이 다임러크라이슬러에 의해 개발되었고, 25.5V, 30V, 36V의 세 가지 다른 전압의 배터리 시스템을 사용하면서 다

임러크라이슬러에 의해 상당한 양의 실험데이터가 수집⁹⁾되었다. 실험에서는 Table 1의 사양을 가지고 다이내모미터를 이용하여 V8 프로토타입 엔진에 스타터-제너레이터가 장착되어 TSG의 모멘트 발생 가용능력, 모터 속도, 배터리 전류 등이 측정되었다.

Table 1 Specifications of the prototype system

Motor	Model W168E19
	Type V8
	Displacement 6208 cm ³
TSG	Model CSG W220E50
	Max. Moment 30 Nm
	Max. Power 6kW
Battery	Max. Efficiency 89% @ 5000rpm
	Hoppecke 12, 25.5, 30, 36V
	Efficiency 92%
6 Speed Automatic	

Fig. 2-4는 다임러크라이슬러의 실험적 데이터의 확대된 결과 특성을 세 가지 다른 전압시스템과 섭씨 25도, 80도에서 각각 속도와 관련하여 보여준다. Fig. 2에서 보여주는 것은 모터의 모멘트 특성이고, 저속 영역에서는 거의 모멘트 생성이 일정함을 보여주고 속도가 점차적으로 증가하면서 고속영역에서는 모멘트가 점점 감소함을 나타낸다. 이 모멘트 발생 특성선도에서 작동온도의 영향은 저속 및 고속 영역 모두에서 중요하지 않으나, 시스템 전압은 고속영역에서만 영향을 미친다. 고속에서 시스템 전압이 감소하면서 모멘트도 감소한다.

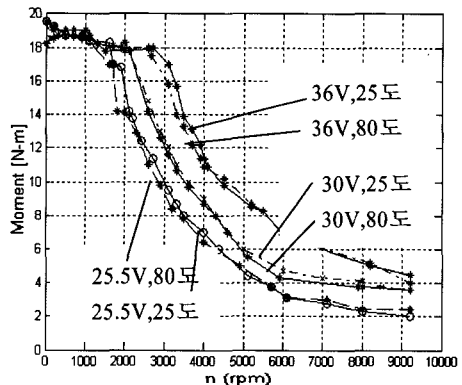


Fig. 2 Moment vs. n (rpm) with three different voltages and at two different temperature(25, 80 in C)

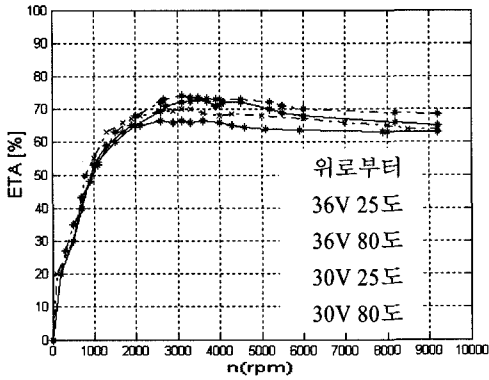


Fig. 3 Efficiency vs. n (rpm) with two different voltages and at two different temperature

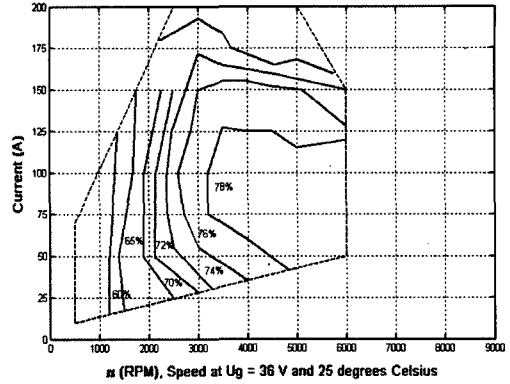


Fig. 5 Battery current vs. n (rpm) at 25 degrees celsius

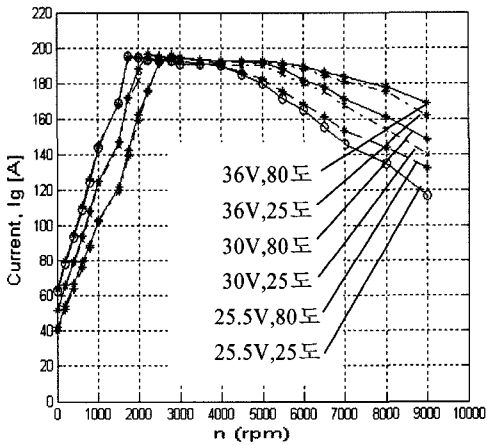


Fig. 4 I_g vs. n (rpm) with three different voltages and at two different temperature

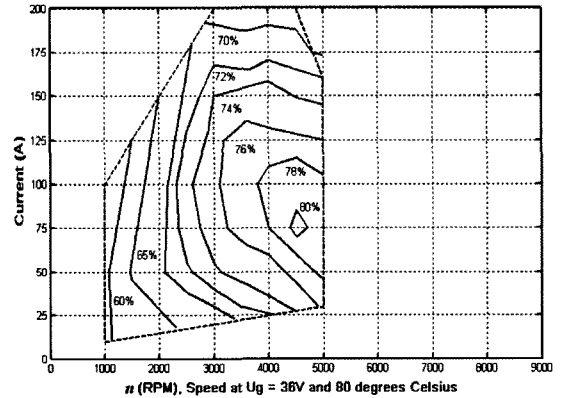


Fig. 6 Battery current vs. n (rpm) at 80 degrees celsius

Fig. 3은 효율특성을 3개의 전압시스템과 2개의 섭씨 온도(25도, 80도)에서 보여준다. 저속영역에서 효율은 선형적으로 증가하고 반면 고속영역에서는 거의 일정한 값을 갖는다. 또한, 작동온도의 영향은 무시할 만 하고, 시스템 전압은 현저한 효과를 나타낸다. 저중속영역인 3000rpm 부근이 가장 효율이 좋은 것으로 나타나 있고, 고전압일수록 더 좋은 시스템 효율을 제공한다.

배터리 전류와 전압의 관계는 Fig. 4에 나타나 있다. 저속영역에서, 배터리 전류는 속도에 비례하며 선형적으로 변하고 반면, 고속영역과 고전압 시스템에서는 배터리 전류는 속도에 무관하게 거의 일정하다 약간 감소함을 알 수 있다.

Fig. 5와 6은 효율 맵을 섭씨 25도와 80도에서 각

각 전류와 속도의 함수로써 나타낸 것이다.

3. 수학적 모델 유도

본 연구에서는 Fig. 1과 7에서 보여지는 시스템의 실험 데이터를 바탕으로 수학적 모델을 구하는 데 목적이 있다. 모터 속도(w)에 대해 배터리전압(U_g)과 원하는 전류값($I_{current}$)이 입력으로 주어졌고, 모터 모멘트(M)와 실제 배터리 전류(I_g)를 계산하고자 한다. 이렇게 개발된 수학적 모델은 파워를 제어 할 알고리즘에 의해 $I_{current}$ 보다 적거나 같은 값으로 제어 될 것이다.

본 연구에서 필요한 식들을 유도하기 위하여 curve fitting 기법을 이용하였다. 이러한 기본적인 플롯은 Fig. 8~10이고, [Ref. 9]의 실험적 데이터인 Fig. 2~4를 시뮬레이션한 결과들이다.

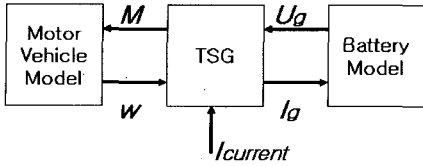


Fig. 7 Input and output quantities for starter/ generator mathematical model

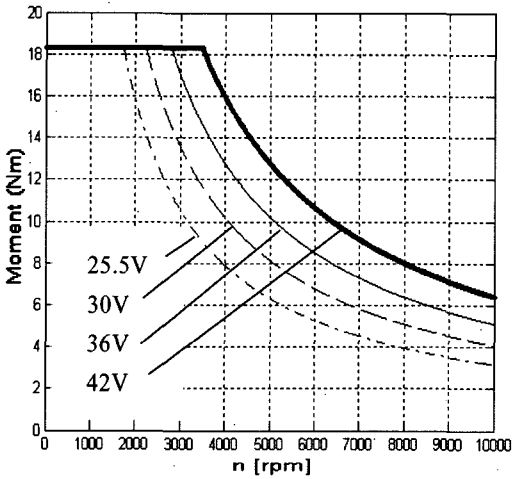


Fig. 8 Maximum moment vs. n (rpm) with four different voltages

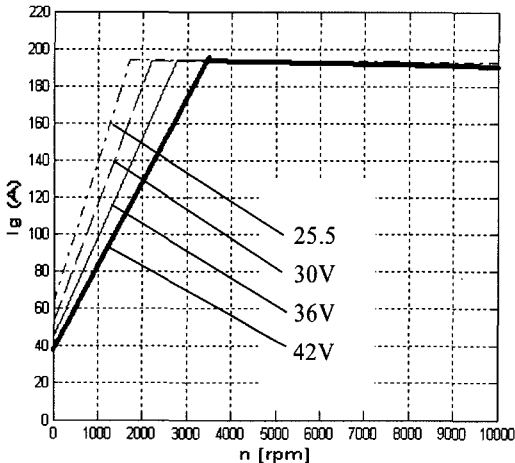


Fig. 9 Maximum current vs. n (rpm) with four different voltages

Fig. 2~4는 모터의 속도변화에 따라 두 개의 영역이 존재함을 보여준다. 저속영역에서 모멘트는 최대 값을 가지면서 거의 상수이고 전류는 모터속도에 선형적으로 비례하면서 증가하다 상수 값을 갖

는다. 그러나 이 때 전압(U_g)에 따라 모멘트와 전류는 다양하게 변한다. 고속영역에서, 전류는 거의 상수이나, 모멘트는 마찬가지로 전압(U_g)에 따라 다르게 변하면서 감소한다. 이처럼 저속과 고속의 두 개 영역이 각각의 작동에 따라서 나뉘어 식으로 유도될 것이다.

앞에서 정의된 파라미터들과 Figs. 8~9의 기본적인 자료를 토대로 수학적 모델의 유도는 단순하게 수행되어졌다. 먼저 Fig. 2에서 초기 모멘트(M_0)를 고려하면 대략적인 값을 다음과 같이 갖는다.

$$M_0 \cong 18.25 \text{ Nm} \quad (1)$$

다음은 Fig. 4에서 최대 전류값(I_0)은 식 (2)와 같이 표시된다.

$$I_0 \cong 195 \text{ A} \quad (2)$$

이들 M_0 와 I_0 은 수학적 모델의 기본적인 파라미터들이 될 것이다. Fig. 3에서의 선들에 직선들을 적용시켰지만, 저속영역에서의 전류와 속도사이의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$I_{gm} = k(w + w_0) / U_g \quad (3)$$

이 때, Fig. 4에서처럼 4000rpm이나 5000rpm 이상에서는 전류가 점차적으로 감소하므로 수학적 모델에서는 또 다른 조건식을 넣을 수 있으나 여기서는 고려하지 않기로 한다. 그러므로 Fig. 9에서의 고속 조건에서는 상수 값을 갖는다.

또, Fig. 3에서 속도의 초기 값 w_0 [rad/s]이 n_0 [rpm]에 상응하여 구해진다.

$$n_0 \cong 833 \text{ [rpm]} \quad (4)$$

$$w_0 \cong 87.23 \text{ [rad/s]} \quad (5)$$

Table 2는 식 (3)의 w_1 과 k 값을 세 개의 전압에 대하여 나타낸다.

어느 전압 U_g 에 대하여 속도 영역을 구분 짓는 경계 속도(w_1)는 식 (6)으로 정의한다.

$$w_1 = \frac{I_0 U_g}{k} - w_0 \quad (6)$$

Table 2 Moment generation coefficients of TSG from experimental data

U_g	n_1	w_1	k
25.5	1733	181	18.925
30.0	2233	234	18.687
36.0	2800	293	18.980

AVG:18.864

또, 저속영역은 $0 \leq w \leq w_1$ 으로 구분한다.

저속영역에서의 모멘트는 이제 다음과 같이 구해진다.

$$M = \frac{M_0 I_g}{I_{gm}} = \frac{M_0 U_g I_g}{k(w + w_0)} \quad (7)$$

단, 제한조건은

$$I_g \leq I_{gm} = k(w + w_0) / U_g \quad (8)$$

$$0 \leq w \leq w_1 = \frac{I_0 U_g}{k} - w_0 \quad (9)$$

이 영역에서 효율(η)은 식 (10)과 같고, 효율은 단지 속도에 의존함을 보여준다.

$$\eta = \frac{Mw}{I_g U_g} = \frac{M}{k} \left(\frac{w}{w + w_0} \right) = \frac{M}{k} \left(\frac{n}{n + n_0} \right) \quad (10)$$

고속 영역인 $w \geq w_1$ 에서의 효율은 $w = w_1$ 일 때, 대략 상수 값을 갖고, 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\eta(w_1) = \frac{M_0}{k} - \frac{M_0 w_0}{I_0 U_g} \quad (11)$$

또, $I_g = I_0$ 이라고 가정하면 전체하중 모멘트 M_{VL} 은 식 (11)의 효율에서 계산된다.

$$\begin{aligned} M_{VL} &= \frac{1}{w} \left(\frac{M_0}{k} - \frac{M_0 w_0}{I_0 U_g} \right) I_0 U_g \\ &= \frac{M_0 I_0 U_g}{kw} - \frac{M_0 w_0}{w} \end{aligned} \quad (12)$$

이 식 (12)은 Fig. 2의 선들과 아주 잘 일치함을 보여준다. 부분하중 조건에서 모멘트는 이상적으로 다음과 같다.

$$M = \frac{I_g}{I_0} M_{VL} = \frac{I_g}{I_0} \left(\frac{M_0}{k} \frac{I_0 U_g}{w} - \frac{M_0 w_0}{w} \right) \quad (13)$$

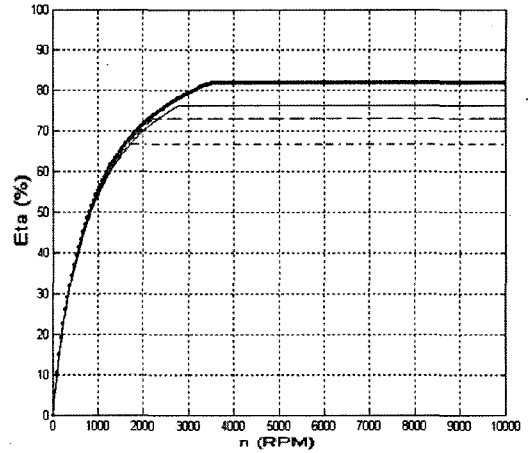


Fig. 10 Efficiency vs. n (rpm) with four different voltages

고속영역에서의 효율은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{Mw}{I_g U_g} = \frac{M_0}{k} - \frac{M_0 w_0}{I_0 U_g} = \eta_{VL} \quad (14)$$

위의 효율식은 상수이고, 속도(w)의 함수가 아니다. Fig. 10은 n_1 이하에서는 일정 효율선들이 거의 직선적으로 증가하고, 대략 식 (10)에 일치한다. 반면 $n > n_1$ 일 때, 효율은 실제적으로 상수는 아니나 일정한 값을 유지하다 전압의 차이에 따라서 다시 감소하는 경향을 알 수 있었다. 본 연구에서는 5000rpm 이상에서는 많이 변하지 않는다고 하여 상수처럼 모델을 유도하여서 Fig. 10과 같이 유도하였다. 또, Fig. 4를 보면 전압이 증가하면서 고속 영역에서는 전류가 점점 감소함을 알 수 있으나 본 연구에서는 따로 식을 추가하지 않고 Fig. 9와 같이 일정 상수를 간단히 이용하였다.

따라서 다음 도표는 실험치와 모델링의 정량적 비교표를 나타내는 데 효율부분과 전류의 편차가 조금 더 많음을 알 수 있다.

4. 결론

실험 데이터의 시뮬레이션된 결과들은 M_0 , I_0 , w_0 , k 등의 파라미터들 값을 결정할 수 있었고, 경계(cutoff) 속도를 찾아내었다. 이러한 파라미터들은 다른 하중 특성 및 모터 운전의 속도영역 상에서 모멘트와 효율을 계산하기 위한 지배방정식의 유도를

Table 3 RMS comparison between experiment and model

정량적 분석 비교 (RMS)				
구분	전압(V)	실험	모델	편차(%)
모멘트 (Nm)	25.5	12.75	12.43	2.53
	30	13.92	13.24	4.93
	36	14.80	13.94	0.06
효율(%)	25.5	56.23	58.00	13.43
	30	61.96	61.99	11.58
	36	62.70	63.70	6.27
전류(A)	25.5	160.5	168.3	4.86
	30	159.2	167.5	5.21
	36	158.4	166.2	4.92

위하여 사용되었다. 25.5V, 30V, 36V 배터리 시스템의 실험데이터를 바탕으로 수학적 모델이 유도되었고, 이는 42V 배터리 시스템에 적용하여 모멘트 가용능력, 배터리 전류, 효율 등을 예측할 수 있었다.

모터운전의 저속영역에서 유도된 식들과 제한적 조건을 가진 식은 모멘트 계산을 간단하고, 매우 빠르게 예측한다. 또한 고속영역에서도 상당히 빠른 속도로 단순한 계산을 거쳐 모멘트를 계산한다. 본 연구에서 모터의 각기 다른 운전조건에서 제안된 모델링을 위하여 유도된 식들은 전체 차량 등의 시물레이션 적용을 가능하게 할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2003학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다. 일부는 두뇌한국 21 사업의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

References

1) J. Park, K. Bae and C. Yoo, "Dynamic Modeling and Simulation of Engine Starting Process for Optimization of Diesel Engine Cold Starting System," Transactions of KSAE, Vol.8

No.1, pp.32-39, 2000.

2) www.sachs.de, DynaStart by Sachs, www.sachs.de

3) S. Murthy, T. Sebastian and B. Liu, "Implications of 42V Battery Power on the Design of Motors for Electric Power Steering System," SAE Technical Papers, 2000-01-3068 Future Transportation Technology Conference & Exposition August 2000, Costa Mesa, CA, USA, Session: 42 Volt Systems, 2000.

4) M. Naidu, H. Rassem and N. Boules, "A 3.4 KW, 42V High-Efficiency Automotive Power Generation System," Book Number: SP-1556, Future Transportation Technology Conference & Exposition, August 2000, Costa Mesa, CA, USA, Session: 42 Volt Systems, 2000.

5) R. R. Henry, B. Lequesne, S. Chen, J. J. Ronning and Y. Xue, "Belt-Driven Starter-Generator for Future 42-Volt Systems," SAE Technical Papers, 2001-01-0728, SAE 2001 World Congress, March 2001, Detroit, MI, USA, Session: 42 Volt Technology, 2001.

6) S. Lu, "42 Volt System," SAE Technical Papers: 2001-01-2713, International Truck & Bus Meeting Exhibition, November 2001, Chicago, IL, USA, Session: Power & Energy Management, 2001.

7) N. Andres, B. C. Jang, R. P. Marimuthu and Y. K. Eom, "A Mathematical Model Development of Automotive 42Volt Battery System and a Starter-Generator," Spring Conference Proceedings, Vol. I, KSAE, pp.507- 514, 2005.

8) B. C. Jang, "Mechatronic V8 Engine Start Capabilities of an Automotive Starter/Generator System at the Super Cold Weather," KSME, Vol.16, No.7, pp.942-949, 2002.

9) M. Krauss, Daimler Chrysler Technical Note TN-FT2/L-1999.014, 1999.