

유한요소법을 이용한 유기압 현수장치의 열전달 해석

배징도[†]·조진래*·이홍우**·송정인**·이진규***

Heat Transfer Analysis of Hydropneumatic Suspension Unit By Finite Element Method

Jing-Do Bae, Hong-Woo Lee, Jung-In Song, Jin-Rae Cho and Jin-Kyoo Lee

Key Words: ISU(압 내장형 유기압 현수장치), Heat flux(열유속), Heat convection coefficient(대류 열전달계수), Heat transfer(열전달)

Abstract

In-arm type hydropneumatic suspension unit(ISU) is an equipment of armed tracked vehicle to absorb impact load and vibration from the irregular ground. During the operation of ISU, main piston moves forward and backward and oil flowing through damper transmits the external impact load to floating piston. Heat is generated in ISU by the oil pressure drop through the damper orifice and the friction between cylinder wall and two pistons. On the other hand, internal heat dissipates outside via heat convection. Occurrence of high temperature can deteriorate durability of major components and basic function of ISU. And, it can cause fatal problem in the ISU life time and the sealing performance of piston rings. As well, the spring constant change of nitrogen gas that is caused by the temperature rise exerts the negative effect to the vehicle stability. Therefore, in this paper, we analyze the heat transfer analysis of the entire ISU unit, by finite element method, with the outside flow velocities 8m/s and 10m/s.

1. 서 론

대부하 고속주행 레도차량은 포장도로를 주행하는 일반차량과는 달리 주로 비포장 험로를 주행하게 된다. 이때, 현수장치는 지면 등으로부터 차체에 전달되는 충격하중의 진동을 빠르게 소진시키는 역할을 수행한다. 압내장형 유기압 현수장치(이하 ISU)는 차량 주행시, ISU본체가 움직여 메인 피스톤의 왕복운동을 일으키고, 이로 인해 작동유는 매니폴드내 유압댐퍼의 오리피스를 거쳐 축압피스톤에 하중을 전달하고 질소가스를 압

축 팽창시킨다. ISU가 위와 같은 과정을 통하여 작동하게 되면, 피스톤의 왕복 운동시 피스톤과 실린더에 의한 마찰에 의해서 열이 발생하고, 댐퍼의 오리피스를 통과하는 작동유의 압력강하에 의해 열이 발생하며, 압축 질소가스의 비가역적인 압축과 팽창에 의해서도 열이 발생하여 ISU 내부온도는 상승하게 된다.

이러한 고열의 발생은 피스톤 링의 실링 메커니즘의 내구 수명 및 성능에 치명적인 문제를 야기할 수 있으며, ISU 구성품의 내구성 및 기본 성능을 현저히 저하시킬 수도 있다. 그리고 온도 상승으로 유발되는 질소 가스의 탄성 변화는 차체의 동특성에도 영향을 미쳐 차량의 자세 제어나 사격시 차체 안정성에 악영향을 미치게 된다.

따라서, ISU의 열전달 해석을 통하여 ISU의 온도 분포를 정확히 예측하고, 그 결과를 토대로

† 부산대학교 대학원 기계설계공학과

* 책임저자, 부산대학교 기계공학부

E-mail : jrcho@hywon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

*** 동명중공업(주) 기술연구소

시스템 및 각 구성 부품의 열 내구성을 평가하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 유한요소법을 이용한 ISU의 열 특성 파악을 목적으로 한다. 차량은 8m/s, 10m/s의 일정한 속도로 움직이고 있다고 가정하고, Static상태에서의 대류 열전달계수와, 주요 발열부인 오리피스와 실린더 마찰부에서의 발열량을 이론 식으로 구하고, 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 ISU의 열특성을 고찰한다.

2. 지배 방정식

ISU의 열전달 해석을 위해 미소 체적 요소에 대하여 열역학 제 1 법칙 (에너지 보존 법칙)을 적용하면, 아래와 같다.

$$\rho c(\Delta x \Delta y \Delta z) \frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \Delta x \Delta y \Delta z + Q' \quad (1)$$

여기서 ρ , c , T , Q' 은 각각 고체의 밀도, 비열, 온도, 열 발생량을 나타낸다.

$$q = -k \nabla T \quad (2)$$

식 (1)에 Fourier의 열전도 법칙인 식 (2)를 적용하고, 열전도계수 k 가 위치에 관계없이 일정하다고 가정하면, 다음과 같은 비정상상태에서의 열전도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q' \quad (3)$$

여기서 q' 은 단위 체적당 발열량을 나타내며, 정

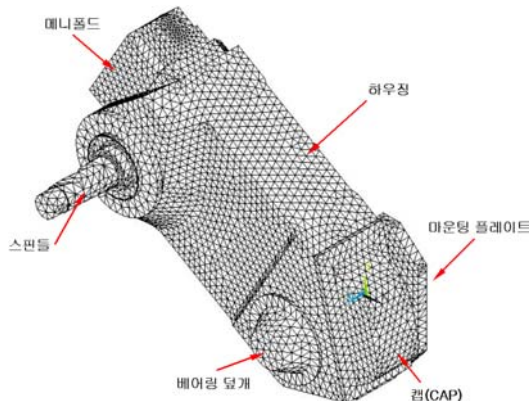


Fig. 1 Finite element Model of ISU

상상태 조건으로부터 $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0$ 이다. 따라서, 내부 열 발생이 있는 정상 열전도에 관한 지배 방정식은 다음과 같이 된다.

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q' = 0 \quad (4)$$

3. 모델링

ISU의 열전달 해석시 형상, 수치계산의 복잡성과 많은 계산시간의 소요를 피하기 위해, 체결 요소는 모델링 대상에서 제외하여 전체 모델을 단순화한다. 매니폴드 내에 장착되는 스프링 등은 형상의 복잡성으로 인하여 격자생성에 어려움이 있고, 또한 ISU시스템의 전체적인 온도 분포에 영향을 미치지 않는다는 판단 하에 모델링에서 제외하였다.

4. 경계조건

4.1 ISU의 외부 대류계수

ISU의 열전달 문제를 해석하기 위해서는 수치 계산상의 경계조건에 해당하는 ISU 표면에서의 대류 열전달 계수 h 값을 알아야 한다. 일반적으로 평판주위의 대류 열전달 계수는 Re (Reynolds number)와 Pr (Prandtl number)의 함수로 되어 있으며 흐름의 상태 즉, 층류 또는

Table. 1 Angular coeff. C of fluid directions

β	C	비고
2π	∞	
π	1.233	Stagnation
1.57	0.759	
0.627	0.510	
0	0.332	Flat plate
-0.314	0.220	
-0.625	0	Separation

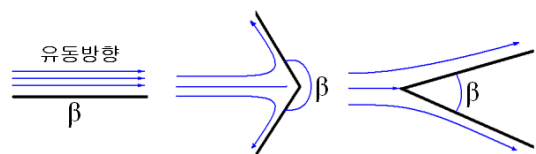


Fig. 2 Angle of plate of fluid directions

난류상태에 대하여 큰 영향을 받는다. 평판주위의 Nu (Nusselt number)은 식 (5)와 같이 Re 와 Pr 의 함수로 표현된다.

$$N_x = C(Re_L^m Pr^n) \quad (5)$$

여기서, C 는 평면의 유동 방향에 대한 각도의 계수이고, m, n 은 유동에 관한 상수이다. Pohlhausen은 평판에서의 층류 유동의 경우에 대하여 국소 Nusselt number를 다음과 같이 제시하였다.

$$Nu_x = \frac{h_x L}{k} = C Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad (6)$$

여기서, $Re_x < 5 \times 10^5$, $0.6 < Pr < 10$ 이며, k 는 열전도율, 하첨자 x 는 판의 선단으로부터의 거리이다. 유동방향으로의 속도 경계층과 열경계층의 변화로 인해 국소 열전달 계수는 평판의 표면을 따라 변하지만, 주로 평균 열전달 계수를 사용하여 결정할 수 있는 전체 표면위의 열전달이 주 관심사이며, 다음 식 (7)과 같이 국소 열전달 계수를 적분함으로써 판 전체의 평균 열전달 계수를 구할 수 있다.

$$h = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (7)$$

차량이 앞으로 전진하게 되면 ISU는 상하로 움직이면서 그 기능을 하게 된다. 그러므로, Fig. 3과 같이 ISU를 7개면으로 나누어 식(6), (7)을 이용해서 외부 대류 열전달 계수를 적용하였다.

4.2 ISU의 내부 대류계수

ISU를 작동시키는 작동유와 질소가스는 실린

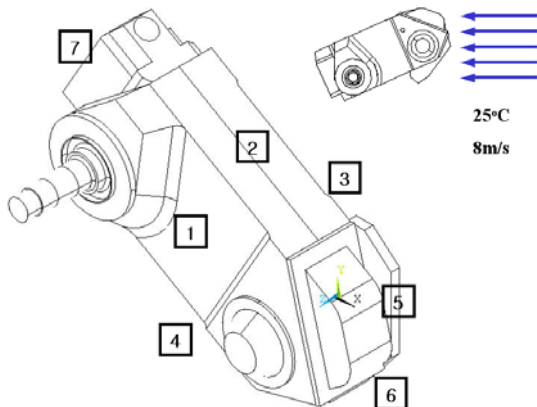


Fig. 3 Convection area of ISU

Table. 2 Nusselt number of Laminar flow

Cross section	rate (w/h)	Nusselt number	
		$T_s = \text{const}$	$q' = \text{const}$
Circle	—	3.66	4.36
Hexagon	—	3.35	4.00
Square	—	2.98	3.61
Rectangle	1	2.98	3.61
	2	3.39	4.12
	6	5.14	6.05
Regular triangle	—	2.47	3.11
Ellipse	1	3.66	4.36
	2	3.74	4.56
	8	3.72	5.09

더와 매니폴드 내를 흐르게 된다. 관 내부의 열전달 역시 ISU 열전달 해석에 있어서 중요하다. 관 내부의 열전달 계수 h 역시 평판에서의 열전달 계수를 구하는 것과 마찬가지로 식 (8)과 나타낼 수 있다.

$$Nu_x = C(Re_D^m Pr^n) = \frac{h_x L}{k} \quad (8)$$

관내를 흐르는 유체가 $Re < 2300$ 이하의 층류 유동인 경우에는 다음의 Table 2와 같이 표면 온도 T_s 가 일정한 경우와 열유속 q' 이 일정한 경우에 따라서 Nu 가 정해지므로 대류 열전달 계수 h 를 쉽게 구할 수 있다.

$Re > 4000$ 인 난류 유동에 대해서는 Chilton-Colburn상사를 이용하면 식 (9)와 같이 구해낼 수 있다.

$$Nu = 0.125 f Re_D Pr^{1/3} \quad (9)$$

여기서 f 는 Fig. 4의 Moody diagram에서 얻어지는 Moody friction factor로 표면의 거칠기에 따라 그 값이 달라짐을 그림을 통해서 알 수 있다. 일반적으로 매끄러운 표면에서의 Moody friction factor의 값은 식 (10), (11)에서 얻을 수 있다.

$$f = 0.316 Re^{-0.25}, \quad Re_D \leq 2 \times 10^4 \quad (10)$$

$$f = 0.184 Re^{-0.2}, \quad Re_D \geq 2 \times 10^4 \quad (11)$$

식 (10), (11)을 식 (9)에 대입하면 매끄러운 관내

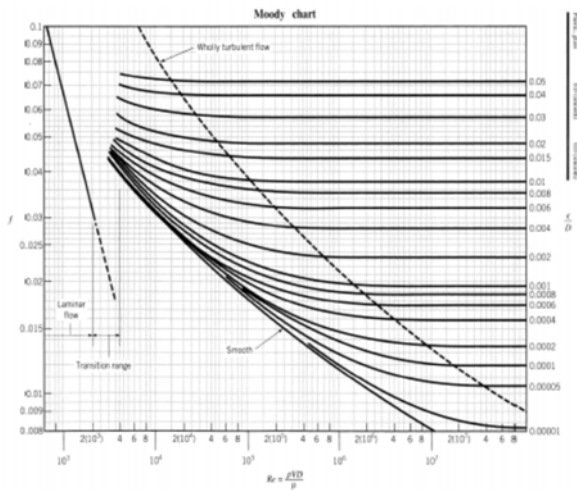


Fig. 4 Moody diagram

에서의 완전 발달된 난류유동의 Nusselt number와 대류 열전달 계수 h 에 대한 아래의 관계식 (12), (13)를 얻는다.

$$Nu = 0.040 Re_D^{0.75} Pr^{1/3} = \frac{hD}{k}, \quad Re_D \leq 2 \times 10^4 \quad (12)$$

$$Nu = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{1/3} = \frac{hD}{k}, \quad Re_D \geq 2 \times 10^4 \quad (13)$$

Fig. 5에 하우징과 매니폴드 내의 작동유가 통과하는 영역을 나타내었다. 이 영역을 모두 10개 구역으로 나누어 난류영역은 완전 발달 난류영역으로, 층류 영역은 열역학적, 유체역학적 입구길이 무시한 완전 발달 층류영역으로 가정하여 식 (8), (12), (13)를 이용하여 대류 열전달 계수를 결정하여 적용하였다.

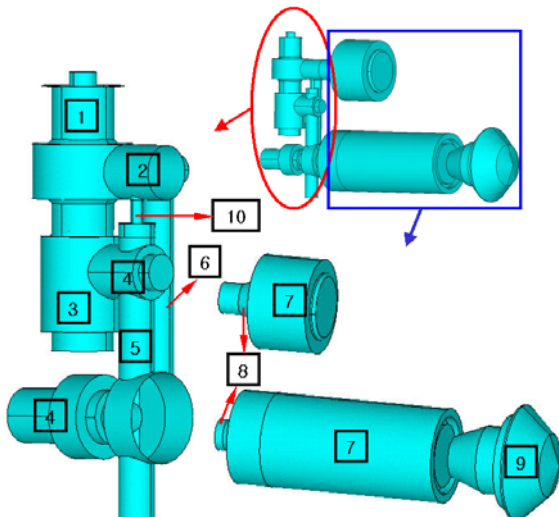


Fig. 5 Convection area in pipe

4.3 오리피스를 통과하는 작동유에 의한 발열

관을 통과하는 유체가 지니는 에너지는 매우 크지만, 관의 표면 거칠기, 관의 재료에 따라 관이 받게 되는 에너지는 각각 다르다. 정확한 발열량을 계산하기 위해서는 작동유에 대한 유동해석과 동역학적 해석을 동시에 수행해야 하고, 매니폴드와 댐퍼의 형상도 간단하지 않아, 해석은 상당히 난해하고, 상당한 시간이 요구된다. 그러므로, 본 연구에서는 댐퍼 부분에 대한 감쇠특성을 이용하여 마찰발열량을 계산하였으며, 오일이 유로를 왕복운동을 하게 되므로, 잘 혼합될 것으로 가정하고 계산된 마찰발열량을 오일이 차지하는 경계면에 부여하여 해석을 진행하였다.

오리피스에 전달되는 에너지, 즉 오리피스 벽면이 발열하게 되는 양을 Darcy-Weisbach 방정식을 이용하여 식 (14)와 같이 얻는다.

$$Q'_{orifice} = E_{Loss} = \rho Q f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2} \quad (14)$$

여기서, f 는 Moody friction factor 이다. 식 (14)를 다시 쓰면 식 (15), (16)과 같다.

$$Q'_{orifice} = 0.316 \rho Q \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2} Re_D^{-0.25} \quad Re_D \leq 2 \times 10^4 \quad (15)$$

$$Q'_{orifice} = 0.184 \rho Q \left(\frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2} Re_D^{-0.2} \quad Re_D \geq 2 \times 10^4 \quad (16)$$

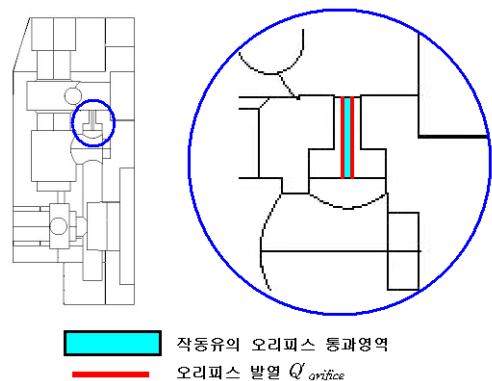


Fig. 6 Generation of heat on orifice

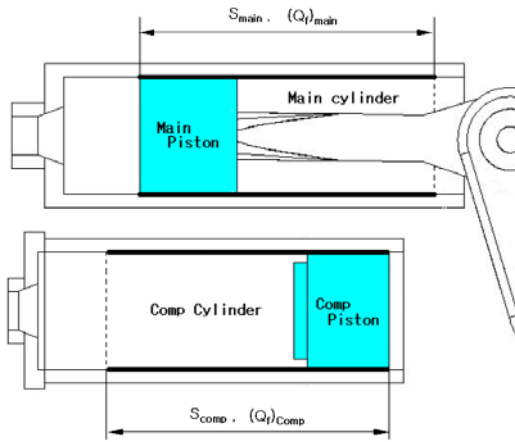


Fig. 7 Generation of heat on cylinders

4.4 피스톤과 실린더의 마찰에 의한 발열

피스톤 시일과 실린더 내면과의 마찰 발열량은 마찰 평균 유효압력(friction mean effective pressure : FMEP)을 이용해서 계산 할 수 있다. 전체 마찰 평균 유효압력과 마찰로 인해 발생하는 발열량은 식 (17)과 같다.

$$f_{mep} = f_1 \left(\frac{S_p}{B} \right) + f_2 \left(1 + \frac{1000}{N} \right) \frac{1}{B^2} \quad (17)$$

여기서 N , S , B , S_p , P_f 는 각각 회전수, 행정, 실린더 직경, 평균 속도, 마찰 일 이며, $V_d (=SB^2)$ 는 엔진 변위의 부피를. f_1 , f_2 는 $2.94 \times 10^2 \text{ kPa} \cdot \text{mm} \cdot \text{s/m}$, $4.06 \times 10^4 \text{ kPa} \cdot \text{mm}^2$ 이다. 본 연구에서는 Fig. 7에 도시한 것과 같이 메인 피스톤과 메인 실린더 사이의 마찰발열량 $(Q)_{Main}$ 와 축압 피스톤과 축압 실린더 사이의 마찰 발열량 $(Q)_{Comp}$ 를 식 (18)을 사용하여 계산하였다.

$$Q'_{friction} = V_d \cdot N \cdot f_{mep} = P_f \quad (18)$$

$$Q'_{friction} = \frac{NSB^2}{60} \times \left\{ f_1 \left(\frac{S_p}{B} \right) + f_2 \left(1 + \frac{1000}{N} \right) \frac{1}{B^2} \right\} \times 10^{-3} \quad (19)$$

5. 해석결과

외부 공기의 유동속도 즉, 차량 이동 속도를

8m/s, 10m/s로 가정하고, 내부 작동유의 온도를 60. C, 80. C로 하여, 모두 4가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다. Table. 3에 각 경우에 따른 각 부분별 최고 온도를 나타내었으며, 8m/s, 60. C의 경우의 해석결과를 Fig. 8~Fig. 10에 나타내었다. 매니폴드에 장착되는 오리피스에서 최고 높은 온도가 나타나며, 피스톤과 실린더의 마찰로 인한 발열이 일어나는 부위에서도 높은 온도를 보인다.

Table. 3 Max. temperature of each parts

Oil 온도	60. C		80. C	
외부유동속도	8m/s	10m/s	8m/s	10m/s
오리피스	76.641	75.459	88.818	87.393
실린더	66.743	64.916	75.910	74.346
매니폴드	66.506	65.295	79.002	77.646
하우징	65.165	64.246	75.663	73.528

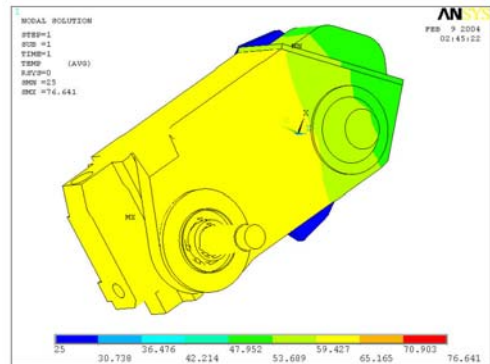


Fig. 8 Result of Temperature of ISU

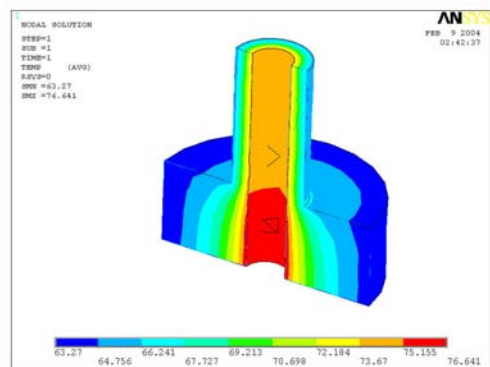


Fig. 9 Result of Temperature of orifice

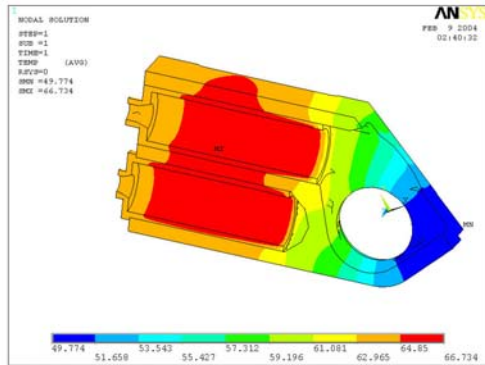


Fig. 10 Result of Temperature of cylinders and housing

6. 결 론

본 연구에서는 ISU의 열전달 특성을 분석하였다. ISU의 열 발생 및 정상상태 열전달 특성을 해석하기 위해 피스톤과 실린더의 마찰에 의한 발열량과 오리피스 통과하는 작동유의 특성에 따른 마찰 발열량을 부여하였으며, 외부 공기에 의한 강제대류와 내부 유체에 의한 강제대류를 경계조건으로 부여하였다. 외부 유동속도에 따른 해석(8m/s, 10m/s)을 수행함으로써, 외부유동속도가 빠를수록 하우징 표면뿐만 아니라, 시스템의 전체적인 온도의 하강을 확인할 수 있었다. 그리고, 내부 오일의 작동온도가 상승하면 ISU의 운동시 전체 시스템의 최고 온도도 상승하지만, 상승폭은 줄어들 수 있었다. 실린더의 경우 열역학적, 유체역학적 입구길이를 무시함으로 해서 내부 대류 열전달계수가 낮게 평가되어 실린더에서의 온도가 높게 측정된 것으로 보인다. 하지만, 피스톤에 장착되는 시일의 최대 작동 온도(Maximum Working Temperature)가 250. C임을 고려할 때, 작동에는 전혀 문제가 없는 것으로 판단할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학재단 특정기초연구(과제 번호 : R01-2001-000-00383)와 동명중공업(주)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) White, Frank. M., 1991, *Viscous fluid flow*, McGraw-Hill Inc.
- (2) Gerhart, Philip M., Gross Richard J. and Hochstein John I., 1992, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley, New York.
- (3) Kay, W. M. and Crawford, M. E., 1993, *Covective heat and mass transfer*, McGraw-Hill Inc.
- (4) Black, Willam Z. and Hartley, James G., 1996, *Thermodynamics*, Haper Collins, New York.
- (5) Frank P. Incropera and David P. DeWitt, 1996, *Fundamentals of heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- (6) Els, P. S. and Grobbelaar, B., 1999, "Heat transfer effects on hydropneumatic suspension system", *Journal of Terramechanics*, vol. 36, pp. 197-205.
- (7) Tong Myung Heavy Industries Co., Ltd., R&D Center, 2000, *Technical Report : The Design and Computational Analysis of ERSU*.
- (8) Daewoo heavy industries & Machinery., Ltd, 2001, *Technical Report : Heat transfer Analysis of Hydropneumatic Suspension Unit a Tracked Vehicle*.
- (9) Tong Myung Heavy Industries Co., Ltd., R&D Center, 2002, *Technical Report : The Design and Computational Analysis of HSU Back-Up Model of NIFV ISU*.
- (10) Cho, J.R., Lee, H.W., Yoo, W.S. and Lee, J.K., 2004, "Study on damping Characteristics of hydropneumatic suspension unit of tracked vehicle," *KSME International*, Vol 18, No. 2, pp. 262-271.