

나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열방출 성능

최영#, 최주원*, 김형만**, 서용위**

Thermal Dissipation Performance of the Ventilated Brake Disc having Helical Grooved Vent

Young Choi #, Joo-Won Choi*, Hyung-Man Kim ** and Yongwie Seo**

ABSTRACT

A brake disc with helical grooved vent in radial direction is proposed for the improvement of thermal dissipation. The heat transfer phenomenon is analyzed for both the proposed disc and the conventional one using finite element method. The thermal dissipation is considerably influenced by the geometrical differences of the brake discs. The results of the analysis show that the proposed brake disc with helical grooved vent has the improved performance to dissipate the thermal energy more effectively.

Key Words : Friction Heat (마찰열), Ventilated Brake Disc (벤틸레이티드 브레이크 디스크), Helical Grooved Vent (나선형 홈이 있는 벤트), FEA (유한요소해석), Maximum Temperature (최대온도), Thermal Dissipation (열방출), Internal Heat Energy (내부 열에너지)

1. 서론

급격하게 증가하는 자동차 수와 더불어 교통 사고의 지속적인 증가는 자동차의 안전시스템에 대한 중요성을 크게 인식시키는 계기가 되고 있으며 엔진의 고출력화, 경량화, 고속화 추세에 따라 자동차의 일차적인 안전시스템인 제동시스템은 더욱 가혹한 상태에서 작동하게 되므로 최근 고성능 브레이크 시스템 개발에 많은 연구가 수행되고 있다.¹⁻⁷

자동차가 주행 중 발생된 운동에너지는 제동 시 대부분 마찰열의 형태로 브레이크 디스크에 전

달되어 결과적으로 디스크와 패드의 접촉면 사이의 온도를 급격하게 상승시키게 되며 이 마찰은 브레이크 마찰면에서의 마멸, 열균열 및 열변형 등을 유발시키고 제동력을 불균일하게 하는 원인이 된다. 이러한 현상들로 인해 디스크에는 안전과 내구성에 유해한 진동을 유발시킴으로써 브레이크 시스템 제동의 비 효율화, 수명단축 및 고장을 일으키는 요인으로 작용한다.³

본 연구에서는 기존의 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 열방출 성능을 향상시키기 위해 개발된 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열방출 성능을 상호 비교 분석하였다.

접수일: 2003년 6월 16일; 게재승인일: 2004년 11월 14일
교신저자: 인제대학교 기계자동차공학부
Email: ychoi@inje.ac.kr, Tel: (055) 320-3755
* 인제대학교 대학원 기계공학과
** 인제대학교 기계자동차공학부

특히, 마찰에 의한 브레이크 디스크 내부의 온도 분포와 디스크 표면과 벤트 홀 부분에서의 열전달 계수에 따른 디스크 내부에 잠재해 있는 내부에너지를 유한요소해석을 통해 비교하였다.

2. 유한요소 모델 및 해석조건

2.1 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크

벤틸레이티드 브레이크 디스크는 솔리드 브레이크 디스크보다 공기 중에 노출되어 회전하기 때문에 방열성능이 월등하여 제동성능이 우수한 장점이 있다. 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열방출 성능을 더욱 개선하기 위해 나선형 홈(helical grooved vent)을 원주방향에 배열한 개량형 벤틸레이티드 브레이크 디스크를 고안하였고⁴, 그 개념도를 Fig. 1 (a)에 나타내었다.

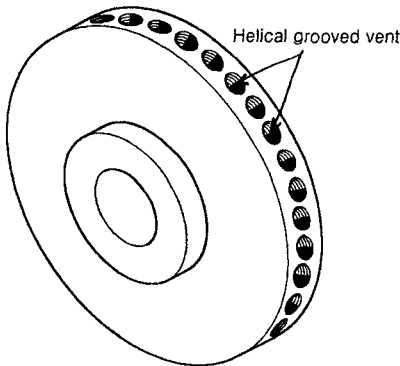


Fig. 1 (a) Schematic view of ventilated brake disc having helical grooved vents

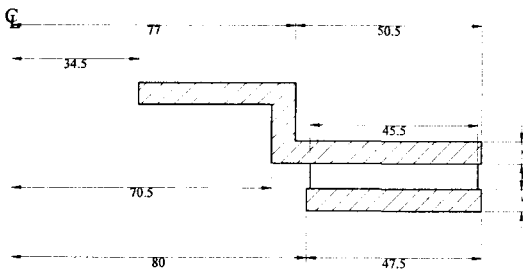


Fig. 1 (b) Cross section of ventilated brake disc

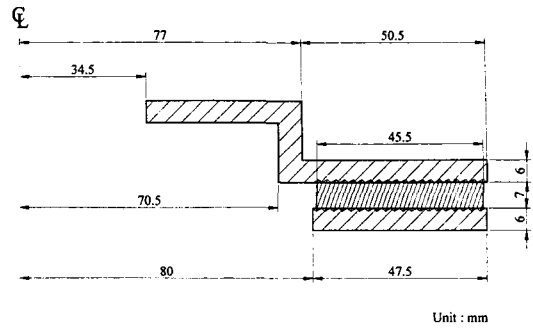


Fig. 1 (c) Cross section of ventilated brake disc having helical grooved vents

Fig. 1 (b)와 (c)에 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 단면도를 나타냈다.

2.2 브레이크 디스크 모델

본 연구에서 해석에 사용한 모델은 기존의 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크에 대해 열특성 규명을 위한 유한요소해석을 수행하였다. 상기 두 종류의 브레이크 디스크의 기하학적 3D 모델링 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 비교하기 위해 전체 크기는 같은 사이즈를 사용하였으며 벤트 홀의 개수도 같은 수의 32개를 사용하여 모델링하였다. 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 나선형 벤트 홀은 직경 7mm의 원형으로 되어 있으며 나사산은 일반 피치가 2mm인 삼각나사 형상을 하고 있다.

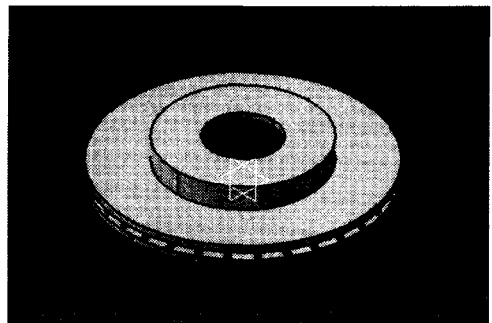


Fig. 2 (a) 3D model of the conventional ventilated brake disc

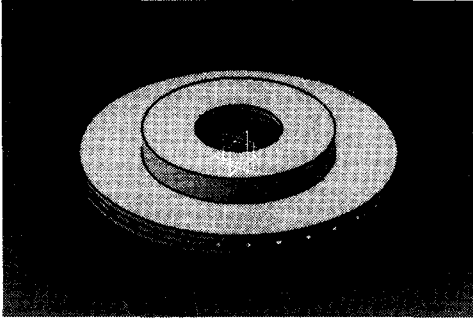


Fig. 2 (b) 3D model of the ventilated brake disc having helical grooved vents

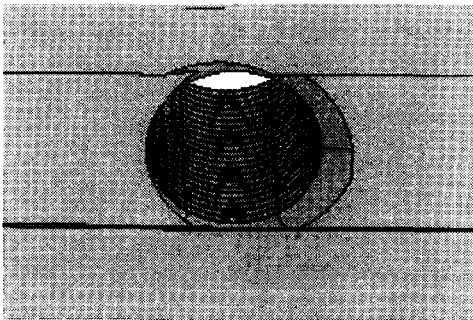


Fig. 2 (c) Shape of helical grooved vent (Threaded hole)

Fig. 2 (a)는 기존의 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크이고, Fig. 2 (b)는 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크이다. Fig. 2 (c)에 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 한 개의 벤트 홀 형상을 나타낸다.

2.3 해석조건

제동시 브레이크 디스크와 패드의 마찰에 의해 발생하는 열에너지는 주행중인 차량의 운동에너지, 바퀴의 관성에너지 및 위치에너지의 총합과 같다. 이때 공기에 의한 항력에너지는 무시한다. 본 해석에서는 Fig. 3과 같은 열하중 조건에 적용할 차량의 속도변화를 나타내었으며 제동시 브레이크 디스크와 패드 사이에 발생하는 마찰은 모두 열에너지로 변환된다고 가정하였다.⁵⁻⁷

제동시 브레이크 디스크와 패드의 마찰에 의한 열속과 냉각과정을 해석하기 위한 벤트 홀 부분과 브레이크 디스크 표면의 열전달 계수는 문헌상의 계산식을 이용하여 적용하였다.⁷

마찰에 의한 열속 q_r'' 의 계산식은 다음과 같다.

$$q_r'' = C_1 C_2 \frac{k m a V(t) \gamma}{\pi (D_0^2 - D_i^2)} \quad (1)$$

C_1 은 전후륜 브레이크의 분담률로 75%, C_2 는 한쪽 브레이크만의 비율로 50%를 적용하였다. k 는 회전체 질량의 보정 계수이며, m 은 차량질량, a 는 감속도, $V(t)$ 는 차량 속도를 나타낸다. 여기서 γ 는 열분담률로 아래와 같다.

$$\gamma = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho_p c_p k_p}{\rho_R c_R k_R} \right)^{1/2}} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 비중, c 는 비열이며 k 는 열전도도이다. 하첨자 R 은 브레이크 디스크에 대한 물성치를 나타내며 하첨자 P 는 패드에 대한 물성치를 의미한다. 브레이크 디스크와 패드의 마찰로 인한 열이 디스크와 패드로 열전달 되는데 본 연구에서는 디스크로 전달되는 열속만이 필요하므로 열분담률(γ)을 식(2)와 같이 구하여 적용하였다.

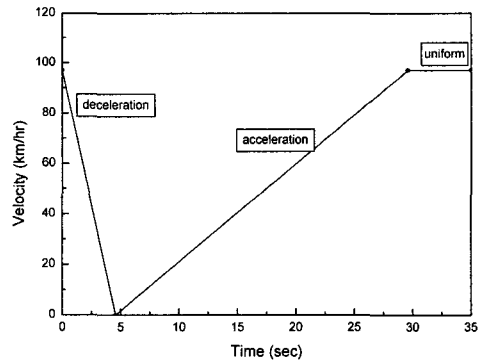


Fig. 3 One cycle of time vs. speed history for a braking condition

열하중 조건은 Fig. 3에 보인 바와 같은 사이클로 가속과 감속을 반복하여 제동하는 조건을 식(1)을 이용하여 마찰에 의해 발생하는 열속을 계산하였다. Fig. 3에 보인 열하중 조건을 10회 반복 적용하여 반복제동시 누적된 열발생과 열방출 특성을 규명토록 하였다.⁶

나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 경우 벤트 홀 부분의 대류열전달 계수는 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 다르므로 대류열전달 계수를 다르게 적용하여야 한다.

Chen⁸, Moon⁹, Gortyshov¹⁰와 Yoon¹¹의 연구결과에 의하면 어떠한 표면이든 그 표면에 작은 홈을

형성할 경우 열전달 효과가 두배 이상 상승되는 것으로 보고되고 있다. 이것을 감안하여 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 사각단면 벤트 홀 부분의 대류열전달 계수⁶ (h_{vent-c})의 1.5배, 2배, 2.5배 및 3배수를 나선형 홈있는 벤트부의 대류열전달 계수(h_{vent-h})로 적용하여 유한요소해석을 수행하였다.

Table 1 (a) Material properties of brake disc

Material	Properties
Elastic modulus, MPa	1.25E5
Poisson's ratio	0.25
Density, kg/m ³	7100
Thermal expansion coefficient, 1/degK	12E-6
Thermal conductivity, W/mK	54
Specific heat, J/kgK	586

Table 1 (b) Material properties of brake pad

Material	Properties
Elastic modulus, MPa	820
Poisson's ratio	0.25
Density, kg/m ³	3660
Thermal expansion coefficient, 1/degK	20E-6
Thermal conductivity, W/mK	1010
Specific heat, J/kgK	1034

디스크와 패드의 재질은 주철과 비석면 계통의 복합재료를 각각 적용하였다. Table 1 (a)와 Table 1 (b)에 유한요소해석 시 적용한 브레이크 디스크의 기계적 물리적 특성을 나타내었다.

2.4 유한요소모델

유한요소해석시 사용한 브레이크 디스크의 형상을 Fig. 4 (a)와 (b)에 각각 나타내었다. 브레이크 디스크는 원주상에서 11.25도의 간격으로 대칭을 이루고 있고 이것이 다시 1/2대칭이므로 해석에 필요한 부분을 ANSYS 자동 격자생성기능을 사용하여 모델링하였다. 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 요소와 절점수는 각각 8115, 14239개 및 3420, 65561개 이며 요소는 10절점 사면체 고차요소를 사용하였다. 두 가지 모델의 비교를 위

해 동일한 크기로 요소 분할을 하였다.

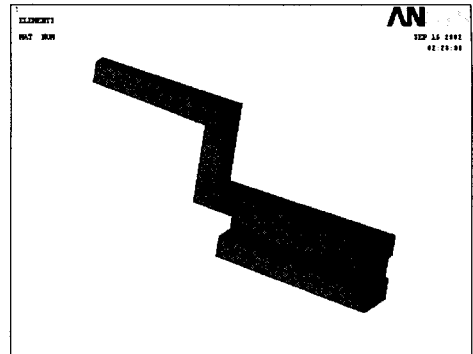


Fig. 4 (a) Finite element mesh model of the simplified ventilated brake disc

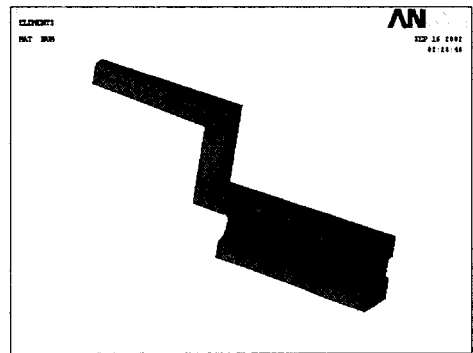


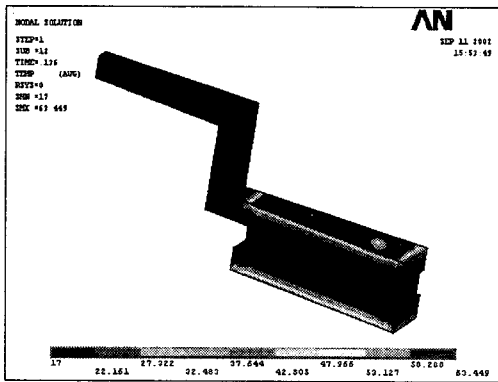
Fig. 4 (b) Finite element mesh model of the simplified ventilated brake disc having helical grooved vent

3. 시뮬레이션

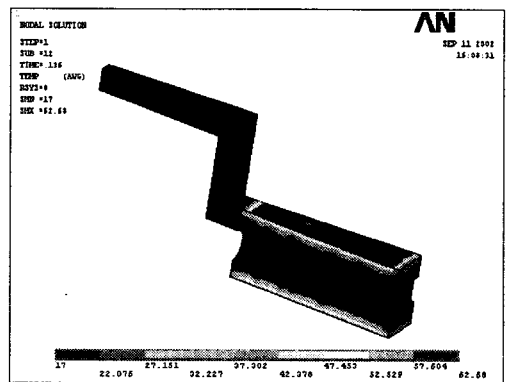
3.1 최대온도

1회 제동 시의 디스크 내부의 온도분포를 제동 후 0.136, 2.083, 4.568초 시간에서 대해 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 나선형 홈이 있는 벤트부의 대류열전달계수 h_{vent-h} 는 $2 \cdot h_{vent-c}$ 를 이용하였다.

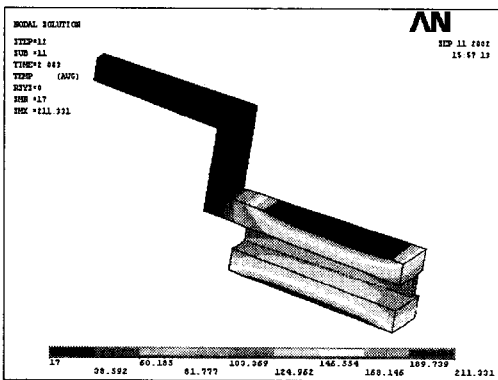
Fig. 5와 Fig. 6에서, 제동후 0.136 (sec)에서, 패드와 접촉하는 브레이크 표면이 가열되고 있음을 알수있고 벤트부의 온도상승이 작다. 0.2083 (sec)에서, 표면에서 발생한 열이 벤트부로 전달되어 벤트부 온도가 상승하며 벤트부에서 대기중으로 열전달이 발생한다. 4.568 (sec)에서 벤트부를 제외한 부분의 온도가 균일하게 분포되는 것을 보인다.



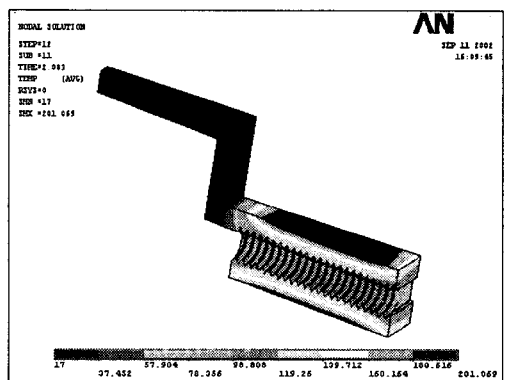
(a) 0.136 (sec)



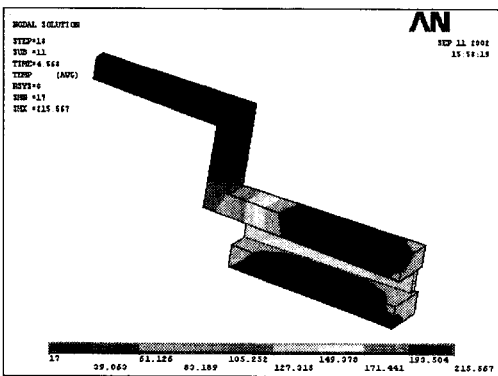
(a) 0.136 (sec)



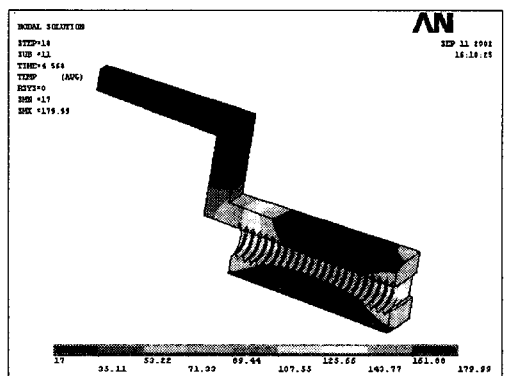
(b) 2.083 (sec)



(b) 2.083 (sec)



(c) 4.568 (sec)



(c) 4.568 (sec)

Fig. 5 Temperature distribution of the conventional ventilated brake disc

Fig. 6 Temperature distribution of the ventilated brake disc having helical grooved vents

나선형 홈이 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 경우에서 열전달이 빨리 진행되는 것을 알 수 있다. 10회 반복 제동시 브레이크 디스크의 최대 온도 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 나선형 홈이 있는 벤트부에 각각의 대류열전달 계수를 적용한 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 최대온도를 표시하였다

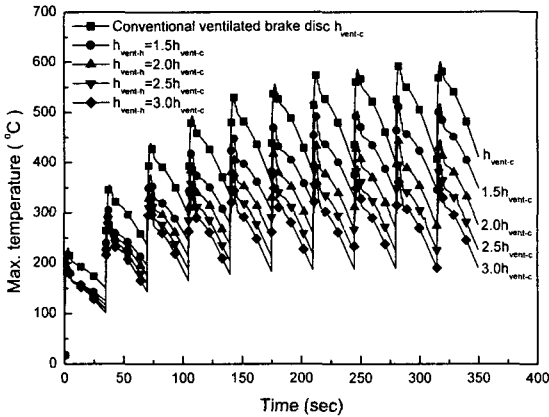


Fig. 7 Maximum temperature rise of brake disc

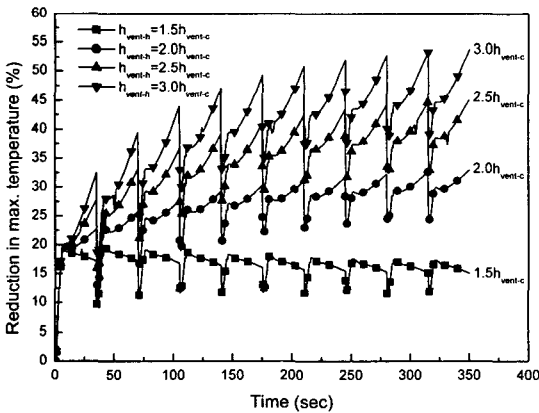


Fig. 8 Reduction in maximum temperature

시간에 따른 최대 온도는 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크보다 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크에서 낮아짐을 볼 수 있다. 또한 대류열전달 계수가 상승함에 따라 방열성능이 좋아져 최대온도가 낮아짐을 알 수 있다.

제동시 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 최대온도에 대한 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드

브레이크 디스크의 최대온도 감소율(%)을 Fig. 8에 나타내었다.

나선형 홈이 있는 벤트부의 대류열전달 계수를 1.5배 적용했을 때 약 15%, 3배를 적용했을 때 최대 53%까지 감소하였다.

3.2 내부에너지

브레이크 디스크의 내부 열에너지는 디스크와 패드의 마찰에 의해 발생한 열이 대기를 통해 방열되고 남은 잔류열에너지로 정의한다. 각 요소의 질량(m_i), 디스크 재질의 비열(C), 각 요소의 변화 온도(Δt_i)를 구하여 반복 제동을 하는 동안의 디스크 내부에너지를 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$Q = \sum_i (m_i \times C \times \Delta t_i) \quad (3)$$

브레이크 디스크의 최대온도는 국부적인 최대값을 나타내는 것에 비해 단위체적당 내부에너지는 평균적인 열적인 성능을 나타내는 값으로 이를 비교하고자 한다.

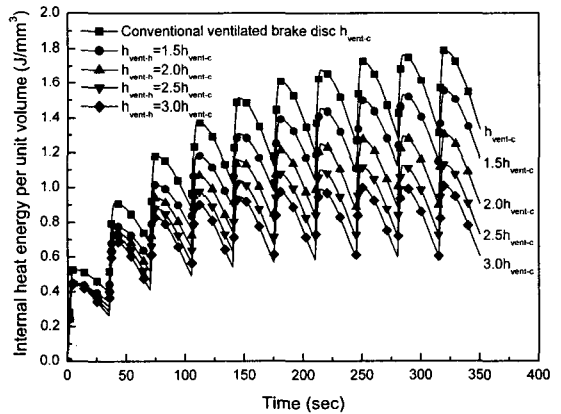


Fig. 9 Internal heat energy of brake disc

일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 벤트부에 각각의 대류열전달 계수를 적용한 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 시간에 따른 단위 체적당 내부에너지 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

1회 제동시에는 내부 열에너지의 차이가 없다가 제동 횟수가 반복될수록 점차 차이가 발생함을 알 수 있다. 이것은 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크보다 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레

이크 디스크가 반복제동 중 대기 중으로 방출하는 열량이 시간이 경과할수록 많아짐을 나타내고 따라서 냉각성능이 월등함을 의미한다.

Fig. 10에 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 단위체적당 내부에너지에 대한 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 단위체적당 내부에너지 감소율(%)을 나타내었다. 나선형 벤트부의 대류열전달 계수가 증가할수록 단위체적당 내부 열에너지의 비율이 커짐을 알 수 있다. 대류 열전달 계수가 1.5배일 때 14.5%, 3배일 때 최대 54.5%까지 단위체적당 내부에너지가 감소함을 볼 수 있다. 이는 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크보다 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크가 방열 성능이 더 우수함을 나타내는 것이다.

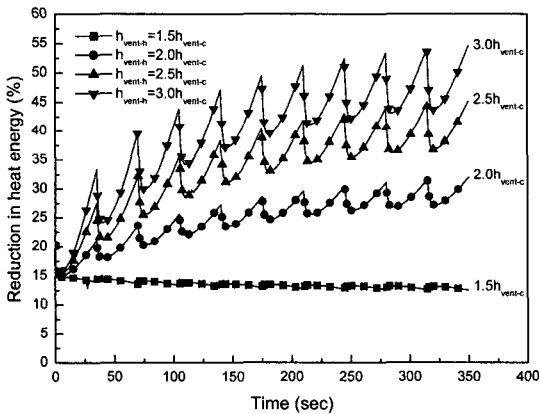


Fig. 10 Reduction in internal heat energy per unit volume

4. 결론

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크와 열전달 성능을 향상시키기 위해 개발한 새로운 타입의 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열방출 성능을 규명하기 위해 10회 반복 제동한 조건에서 시물레이션한 결과를 비교하였다. 10회 반복 제동시의 최대 온도에서 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크가 기존에 사용되는 일반 벤틸레이티드 브레이크 디스크보다 열전달 계수에 따라 15-50% 정도 낮아짐을 알 수 있었으며, 브레이크 디스크의 내부 열에너지를 분석한 결과, 14.5-54.5% 정도 단위체적당 내부에너지가

감소함을 알 수 있었다. 이는 나선형 홈이 있는 벤틸레이티드 브레이크 디스크의 열 방출 성능이 우수함을 보이는 것이다.

참고문헌

- Day A. J., Ashi A. B., "Heat Flow and Temperatures in Friction Material During Braking," I. Mech. E., 1991.
- Yun Y. H., Jang B. C., Lee, S. C. "Active Handling Control of the Differential Brake System Using Fuzzy Controller," J of KSPE, Vol.20, No. 5, pp. 82-91, 2003.
- Kim C. K., Sung B. Y., "Thermal Behavior Analysis of Disc Brake System During Quick Braking," Trans. of KSME A, Vol. 22, No. 6, pp. 1106-1113, 1998.
- Lee D. H., Boo K. S., Kim H. M., Kim H. S., Choi Y., "To Improve Thermal Dissipation Performance Brake Disc for Automobile," Korea Patent Pending, No. 10-2002-0049360, 2002.
- Lee S. K., Sung B. Y., Ha S. K., "Optimal Design of Ventilated Disc Brake Rotor," Trans. of KSME A, Vol. 24, No. 3, pp. 593-602, 2000.
- Jung S. J., "Analysis of Heat Transfer, Guide Book for ANSYS Application (II)," Tae Sung S&E Inc., pp. 225-228, 2000.
- Limpert R., "Brake Design and Safety," SAE, Warrendale, pp.111-143, 1992.
- Chen J., Steinhagen H. M., Duffy G., "Heat Transfer," 2001.
- Moon H. K., O'Connell T., Glezer B., "Channel Height Effect on Heat Transfer and Friction in a Dimpled Passage," Journal of ASME, 1999.
- Gortyshov Y. F., Popov I. a., Amirhanov R. D., Gulitsky K. E., "Studies of Hydrodynamics and Heat Exchange in Channels with Various Types of Intensifiers," Heat Transfer, Proceedings of 11th IHTC. Vol.6, August 23-28, 1998.
- Yoon G. I., Minh N. Q., Cho M. C., Lee D. H., "A Study of Heat Transfer Characteristics in the Flow Passage inside the Disc Brake," Winter Proceeding of SAREK, pp. 743-748, 2002.