

< 응용 논문 >

브레이크 다이내모미터를 활용한 KIC(Korea International Circuit) 주행 수준의 브레이크 고속 페이드 시험 모드 개발

유덕현* · 이필구

한국자동차연구원 프리미엄자동차연구센터

Development of Brake High Speed Fade Test Mode of KIC(Korea International Circuit) Driving Level Using Brake Dynamometer

Duckhyun Yu* · Pilgu Lee

Premium Vehicle R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 46 Fl-ro, Samho-eup, Yeongam-gun, Jeonnam 58463, Korea
(Received 28 August 2020 / Revised 14 October 2020 / Accepted 16 October 2020)

Abstract : In this study, a fade test method was developed in order to reproduce the total braking energy generated by the braking system during KIC driving on a dynamometer. The total braking energy can be derived by calculating the deceleration using the entry speed of each corner and the exit speed and time required after brake braking, and by calculating the braking energy and power generated at this time. In addition, by dividing the total amount of braking energy by the total number of braking, the labor generated during one braking is divided by the total number of braking of the braking dynamometer in order to realize the total working power of the braking energy. In order to match the actual vehicle and brake cooling state, the wind speed was derived by measuring the actual vehicle cooling state for each speed by using the heat transfer function. This has confirmed the possibility of developing the KIC test mode.

Key words : Brake dynamometer(브레이크 다이내모미터), KIC(국제자동차경주장), Braking test(제동시험), Test mode(시험법), Cooling air condition(냉각 풍속 조건), Heat transfer coefficient(열전달 계수), Brake energy(브레이크 에너지)

1. 서론

최근 들어 완성차 업체에서는 내연기관에 터보 차저가 장착된 200 마력 이상의 고성능 차량 모델 증가와 함께 자동차의 가속성능이 급격히 상승하고 있다. 이러한 현상을 뒷받침하듯 주행 안정성을 위해 가속성능이 증가될수록 감속 능력도 매우 중요한 요소 중 하나이며 브레이크 튜닝에 대한 관심도 매우 높아지고 있다.

고성능 차량에서의 가속과 감속은 기존의 자연흡기 엔진차량보다 더 큰 운동에너지가 발생하게 되고, 큰 운동에너지는 감속이 열에너지로 전환되어 브레이크 시스템에 그대로 전달된다.¹⁾

이와 같은 이유로 높은 온도에서도 안정적인 제동성

능 보장을 위한 고성능 브레이크에 대한 관심도 매우 많아지고 있다. 이러한 영향으로 국내 차량에 고성능 수입 캘리퍼가 순정부품으로 장착되기도 하며, 국내 브레이크 튜닝 업체에서 다양한 고성능 브레이크를 출시하여 소비자의 요구를 충족하고 있다.²⁾

하지만, 현재 서킷수준의 고부하 브레이크 시험법이 아직 없어 고성능 브레이크 시스템에 대한 성능을 확인할 기준이 아직 없다. 현재는 실차 시험 주행을 통해 전문 드라이버의 감성평가에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 기존의 브레이크 시험법을 대체할 수 있는 서킷주행 수준의 고부하 브레이크 시험법 개발이 필요하다.

본 논문에서는 고성능 브레이크 시스템 평가를 위해 비용과 시간이 많이 소모되는 실차시험을 대신할 국내

*Corresponding author, E-mail: yudh@katech.re.kr

¹⁾This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

F1 서킷 주행과 동일한 수준의 브레이크 시험법을 제시하고 다이내모미터(Dynamometer)에서 구현하여 실효성을 증명하고자 한다.

2. KIC 주행 데이터 분석

국내 차량개발을 위해 자동차 제조회사에서 내구 시험을 진행할 정도로 가속도가 높은 국내 최대 및 최장 서킷인 영암 국제자동차경주장(KIC)(Fig. 1)으로 선정하였다.

시험차량의 최대 주행 성능으로 주행하여 고온 및 고속 제동에 대한 브레이크 시스템의 가속도를 계측된 데이터를 이용하여 분석을 진행하였다.

시험에 사용된 차량은 HMC Genesis coupe 2.0 T(Fig. 2)이다.

주행데이터 기록 및 온도계측은 레이싱 계측 장비로 많이 사용되고 있는 Racelogic社 VBOX 3i System을 사용하였다(Fig. 3).

Best lap에 대한 분석된 데이터는 Fig. 4와 같다. 빨간색 박스 구간은 제동구간이며 총 제동 횟수는 13회, 평균 속도는 101 km/h로 산출되었다.



Fig. 1 Korea international circuit



Fig. 2 Test vehicle (HMC Genesis coupe)

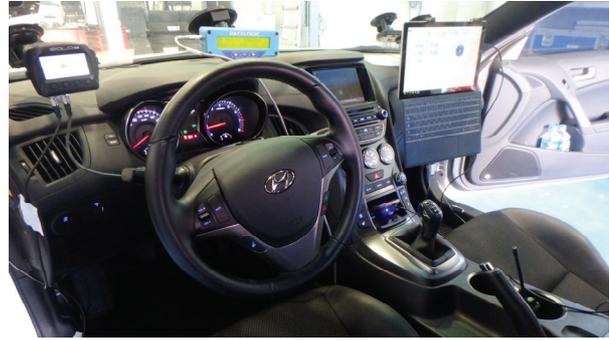


Fig. 3 Installation of VBOX 3i system in test car

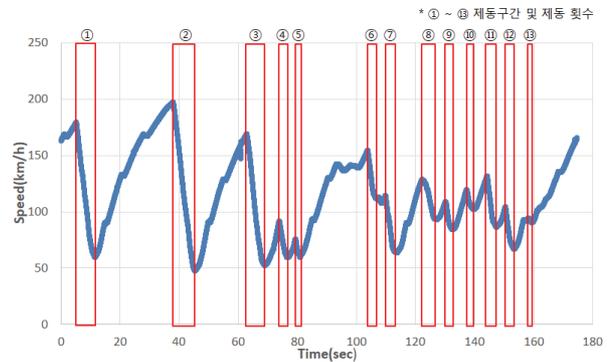


Fig. 4 Vehicle speed and braking point at a KIC

3. 누적 일률 계산

실제 차량이 KIC를 주행하면서 발생하는 제동 가속도를 대변할 수 있는 값으로 누적일률(Accumulated power)을 사용할 수 있다.^{3,4)}

서킷 주行的 특성상 가속이 아닌 가속과 감속만 이루어지고 있어 차량의 운동에너지의 변화는 결국 가속은 엔진의 출력과 직결되고 감속은 브레이크 에너지에 의해 이뤄진다고 볼 수 있다.

따라서 13개 제동구간의 초기속도, 최종속도 및 제동 시간 데이터를 이용하여 식 (1) 및 식 (2)를 통해 Table 1과 같이 브레이크에 대한 누적 일률을 계산할 수 있다.

$$E_B = \frac{1}{2} m_v (v_i^2 - v_f^2) \tag{1}$$

E_B : braking energy(J)

m_v : vehicle mass(kg)

v_i : initial speed(m/s)

v_f : final speed(m/s)

Table 1 Calculation of braking time and reduced brake energy for KIC 1LAP

No.	Initial speed (m/s)	Final speed (m/s)	Braking time (s)	Brake energy (kJ)	Accumulated power (kW)
1	49.7	16.6	6.3	1,715	274
2	54.8	13.3	7.3	2,205	302
3	46.9	14.6	6.2	1,551	249
4	25.6	16.6	2.9	295	103
5	20.9	17.1	2.0	114	58
6	42.1	29.9	4.6	681	149
7	31.8	17.9	3.5	537	152
8	35.8	26.0	4.5	468	104
9	30.1	23.5	2.3	279	123
10	33.1	28.6	2.1	218	104
11	36.6	24.4	3.7	581	156
12	29.1	18.5	3.0	391	131
13	26.2	25.2	1.2	39	31
Total				9,073	1,940
Average				698	149

$$P_{Acc} = \sum \frac{\partial E_B}{\partial t} \quad (2)$$

P_{Acc} : accumulated power(J/s)
 t : braking time(s)

4. 시험 모드 생성

Table 1에서 13번 제동 과정 동안 발생한 총 제동에너지는 9,073 kJ이고, 1회 제동 평균 698 kJ의 제동 에너지가 발생하였다.

차량 무게 1,560 kg, 제동구간의 평균 속도 101 km/h, 1회 제동 시 평균 에너지 698 kJ을 식 (1)에 대입하면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$698 \text{ [kJ]} = \frac{1}{2} \times 1560 \text{ [kg]} \times ((101 \text{ [km]} + X)^2 - (101 \text{ [km]} - X)^2) \quad (3)$$

X : speed variation(km/h)

식 (3)으로부터 제동 초기속도와 최종속도의 편차인 25 km/h로 계산되고, 이것은 평균속도 101 km/h를 기준으로 제동초기속도 126 km/h 제동 최종 속도는 76 km/h일 때 698 kJ의 제동에너지가 발생한다는 것을 의미한다. 한편, 1회 제동시 평균 누적 일률은 149 kW이고 평균 제동 에너지는 698 kJ이다. 이 값을 식 (2)에 대입하면

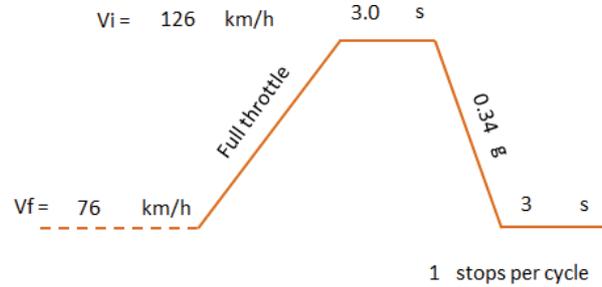


Fig. 5 High speed fade test mode using brake dynamometer

1회 제동시 평균 제동시간은 4.68 s로 환산된다. 진입속도와 출구속도 그리고 제동시간을 알면 감속도를 계산할 수 있다. 계산된 평균 감속도는 0.34 g이다. 계산 값을 바탕으로 Fig. 5와 같은 다이내모미터 고속 페이드 시험 모드를 생성하였다. Fig. 5의 조건을 13회 반복했을 때 생성되는 제동에너지의 총합은 서킷 1바퀴 주행 시 발생하는 제동에너지의 총합과 같다.

5. 풍속 조건 설정

현재까지 사용되고 있는 브레이크 다이내모미터 시험법은 풍속을 일정하게 고정하여 모든 시험에 동일하게 적용하여 진행한다. 하지만 이 조건을 그대로 적용하기에는 코너링이 많고 직선구간이 매우 짧은 서킷 주행의 특성상 적합하지 않다.

브레이크는 운동에너지를 열에너지로 바꾸어 운동에너지 감소를 진행하기 때문에 반드시 추가적으로 열에너지 발산에 영향을 미치는 풍속조건을 고려해야 한다.⁵⁾ 풍속조건은 실차와 동일한 냉각 조건을 찾기 위해 뉴턴의 냉각법칙을 사용하여 실차의 열전달 계수를 측정하여 다이내모미터의 냉각 조건을 설정하고자 하였다.

$$- \frac{hA}{mC_p} (T - T_{\infty}) = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

h : heat transfer coefficient(W/m^2K)

A : swept area(m^2)

m : disc mass(kg)

C_p : specific heat(J/kgK)

T : initial temperature(K)

T_{∞} : ambient temperature(K)

ΔT : delta temperature(K)

Δt : delta time(s)

뉴턴의 냉각 법칙인 식 (4)를 이용하여 풍속조건을 계산하기 위해 열전달 계수인 h 를 식 (5)를 통해 구하고자

하였다. 식 (5)에서 알 수 있는 데이터는 속도 데이터인 V 이며 실차 데이터를 총 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h 총 3개의 속도별로 500 °C에서 300 °C까지 냉각 시간을 Fig. 6과 같이 측정하였다.

실차 브레이크 디스크 온도 측정을 위해 디스크에 Fig.

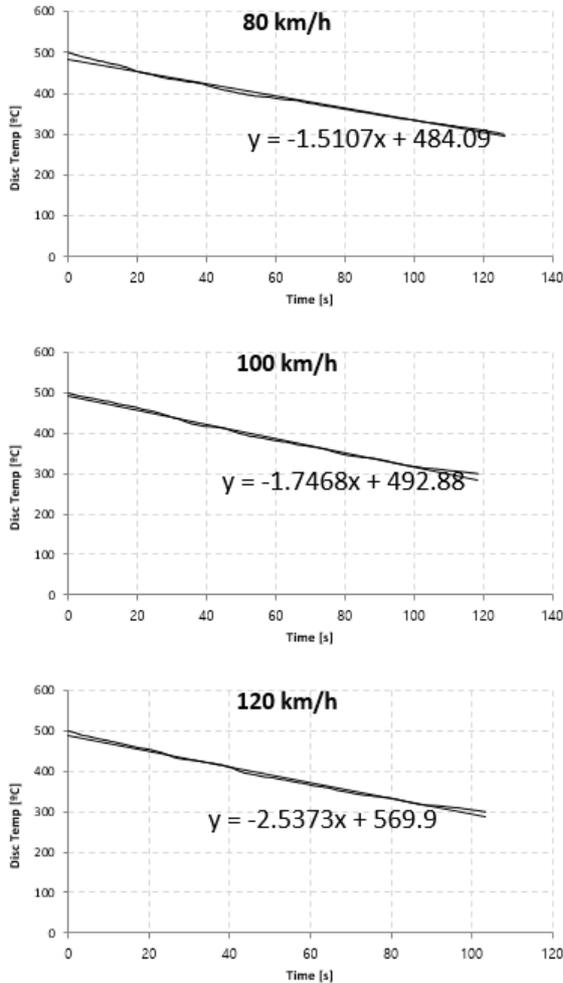


Fig. 6 Real vehicle cooling characteristics test for each speed



Fig. 7 Installation of thermocouple in test car

7과 같이 온도센서(Thermocouple)를 설치하여 실시간 온도 데이터를 측정하였다.

각 속도별로 세 개의 h 값을 계산하여보면 80 km/h 구간에서는 $108.9 \text{ W/m}^2\text{K}$, 100 km/h 구간에서는 $142 \text{ W/m}^2\text{K}$, 120 km/h 구간에서는 $175 \text{ W/m}^2\text{K}$ 가 계산된다. 이 값을 식 (5)에 대입하여 방정식을 연립하여 풀어보면 세 개의 변수 h_{still} , α , φ 의 값은 각각 $9.7\text{E-}07$, 2.92, 1.17로 계산되었으며, 제동 구간동안의 평균 속도인 101 km/h로 대입하여 다시 계산해보면 최종 값은 $143.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 가 계산된다.

계산된 h 값을 식 (4)에 대입하여 ∂t 를 계산하기 위해 실차에 적용된 브레이크 시스템을 이용하여 각각의 변수를 측정하였다. 실제 페드가 마찰되는 디스크의 면적 (A)을 측정 한 값은 0.204 m^2 , 디스크의 질량(m)은 9.41 kg, 비열(C_p)(5)은 $560 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, 주위온도(T_∞)는 300 K로 측정하였으며, 냉각 온도 구간을 실차와 동일한 500 °C (T)에서 300 °C(ΔT)구간으로 설정하고 계산하여 풀어 주면 Δt 의 값은 99초가 계산된다.

$$h = h_{still} + \alpha * V^\varphi \quad (5)$$

h : heat transfer coefficient($\text{W/m}^2\text{K}$)

V : vehicle speed(m/s)

계산된 시간 99초의 냉각 풍속을 찾기 위해 다이나모 미터를 이용하여 페드 온도를 550 °C 이상 올리고, 평균 주행속도로 일정하게 디스크를 회전하여 반복실험을 통해 디스크의 온도가 500 °C에서 300 °C가 냉각되는 구간이 116초인 풍속도는 13 m/s임을 확인하였다. 실험 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 3회 반복 실험하여 그래프에 나타내었다. 시험 결과 그래프는 다음 Fig. 8과 같다.

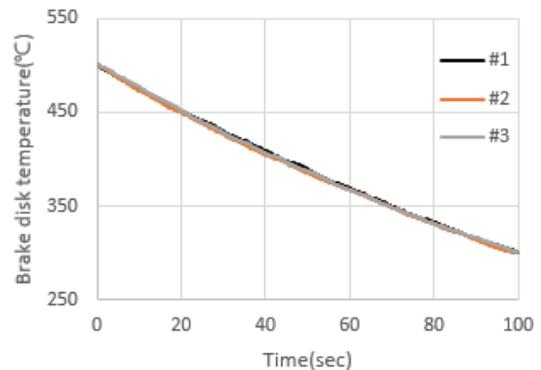


Fig. 8 Brake dynamometer wind speed test result

6. 시험 결과

본 논문에서 제시하고 있는 시험법을 증명하기 위해 Fig. 9와 같이 실차와 동일한 모델의 브레이크 시스템을 브레이크 다이내모미터에 장착 후 시험을 진행하였다.

시험 결과는 Fig. 10과 같다. 서킷 주행의 디스크온도 변화와 3절 및 4절에서 생성한 시험법 및 풍속 조건을 이용하여 브레이크 다이내모미터에서 측정된 디스크 온도 결과를 비교한 그래프이다.

디스크 온도는 LAP이 증가할수록 점차적으로 상승을 보이다가 Lap4에서 약 450 °C 영역에서 수렴해가고 있다. 실차시험과 브레이크다이내모미터의 온도 변화를 보면 직선거리가 길어 차량의 최대속도가 나오는 특정 구간의 KIC 특성을 감안하면 전체적으로 매우 유사한 형태의 온도 상승을 성공적으로 추정하고 있음을 확인할 수 있다.



Fig. 9 Brake dynamometer test

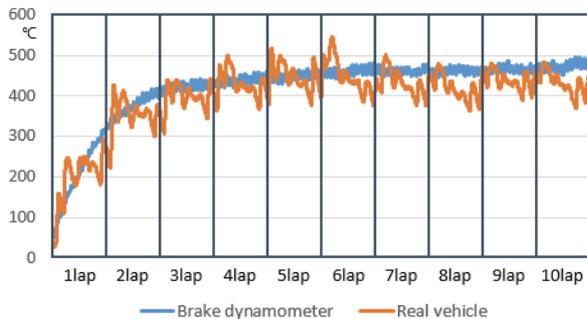


Fig. 10 Comparison of dynamometer results and actual vehicle results

7. 결론

실차시험 데이터를 이용하여 시험모드 조건을 생성하고, 풍속 조건을 실차와 유사하게 재현하여 다음과 같은 결론을 확인하였다.

1) 국내 KIC 서킷 주행 시 차량에서 취득 가능한 데이터를 분석하여 브레이크 다이내모미터를 위한 고속 페

이드 모드 시험법을 생성하였다.

- 2) 뉴턴의 냉각법칙과 실차의 냉각 데이터를 활용하여 실차 환결과 유사한 다이내모미터에서의 풍속을 찾아내었다.
- 3) 브레이크 다이내모미터를 활용하여 KIC 주행 시 브레이크 시스템에 가해지는 일률을 유사한 형태로 재현하여, 400 °C~500 °C 사이에서 실차 시험 결과와 유사한 형태로 온도 상승률을 보여주고 있음을 확인하였다.

연구 결과에 대한 전체적인 내용을 검토 결과, 각 차량의 성능에 따라 KIC 주행 시 브레이크 시스템에 가해지는 에너지의 차이가 발생하여 차량의 스펙에 따라 일률이 달라지기 때문에 반드시 서킷 주행 데이터를 필요로 한다. 이와 같은 이유로 고속 페이드 모드 시험법에 대한 데이터 축적이 필요함을 확인하였다. 향후 본 연구 결과를 바탕으로 차량의 성능에 따른 데이터를 축적하여 차량에 대한 기본적인 스펙 입력만으로 KIC 주행 수준의 고속 페이드 모드 시험을 브레이크 다이내모미터에서 재현해 낼 수 있도록 수정, 보완해 나갈 계획이다.

후 기

이 연구는 2019년도 산업위기지역미래형전기차부품개발 연구비 지원에 의한 연구임(20005742, IoT 활용 스마트브레이크 모니터링 시스템 개발).

References

- 1) S. P. Jung, K. J. Jun, T. W. Park and J. H. Yoon, "Development of the Brake System Design Program for a Vehicle," Int. J. Automotive Technology, Vol.9, No.1, pp.45-51, 2008.
- 2) S. P. Jung and H. B. Park, "Analysis of Influence Parameters for Brake System's Performance during High Speed Braking," Transactions of KSAE, Vol.26, No.2, pp.196-201, 2018.
- 3) W. S. Chung, S. P. Jung and T. W. Park, "Analysis Method to Estimate Thermal Deformation of a Ventilated Disc for Automotives," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.24, No.11, pp.2189-2195, 2010.
- 4) R. Limpert, Brake Design and Safety, SAE, USA, pp. 293-350, 1974.
- 5) C. W. Park and D. R. Lee, "Study on Cooling Performance by Convective Heat Transfer with Different Disk Brake Shapes," Korean Society for Computational Fluids Engineers, Vol.21, No.1, pp.64-71, 2016.