

레이저 플라즈마 분광 기법을 이용한 금속 마찰 표면에서 물질전달 측정

윤상우*, 김지훈*, 김주한*[#]

*서울과학기술대학교 일반대학원 기계공학과

Measurement of Mass Transfer from Metal Friction Surfaces using Laser Plasma Spectroscopy

Sangwoo Yoon*, Jihoon Kim*, Joohan Kim*[#]

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology

(Received 26 May 2017; received in revised form 29 June 2017; accepted 14 July 2017)

ABSTRACT

We quantitatively measured the mass transfer from friction surfaces, specifically brake pads and rotors, using laser plasma spectroscopy. Specifically, we modelled the mass transfer from the pad to the rotor and measured the elemental diffusion intensity distribution in the rotor material using laser plasma spectroscopy. The main elements measured were Cu, Ni, Ti, and Cr, and the distribution of these after transfer was measured as the ratio of the atomic peak and the ion peak of the plasma in the rotor exposed to friction and the surface composition of the rotor and the roughness, respectively. We measured and quantified the diffusion coefficient for each element through the mass transfer model and found that Cr obtained the largest diffusion coefficient (D) of the elements measured based on this system with a value of $1.9484 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$.

Key Words : LIBS(레이저 유도 플라즈마 분광 기법), Surface Roughness(표면 거칠기), Mass Transfer(물질전달)

1. 서 론

많은 기계 부품들이 마찰에 의해 그 표면 상태의 변화가 나타나고 이를 통해 물성치의 변화가 생긴다. 이러한 현상에 따라 마찰면을 가진 기계 부품들의 기능적 표면특성의 변화가 사용기간에 따라 나타나게 된다^{1,2)}. 이러한 것은 실제로 여러 원인에

의해 발생되는 현상이지만 그 중 접촉면에서의 물질 확산이 중요한 원인으로 해석될 수 있다³⁾. 여러 응용 중에서 이러한 마찰면의 확산현상이 중요시되는 케이스 중 하나는 자동차의 브레이크 패드와 로터로 이루어진 브레이크 시스템이다^{4,5)}. 일반적으로 자동차 브레이크 시스템에 의한 제동 시 브레이크 패드와 로터 간에는 강한 마찰력이 발생하며 브레이크 패드에서의 원소들이 마찰에 의한 열로 확산이 가속화되어 로터표면에서의 물성치 변화가 일어난다. 이러한 외부 원소의 확산 침투에 의한 표면 물성치 변화 중 특히 표면 마이크로 형상

Corresponding Author : joohankim@seoultech.ac.kr

Tel: +82-02-970-6314

의 변화에 따른 마찰 특성의 변화를 예상할 수 있으며 그 결과를 모델링하고 예측하는 것이 중요하다^[6,7]. 하지만 실제로 이러한 확산 현상(Fig. 1)을 고체 재료 내에서 공간적으로 측정하는 것은 어려운 일이다. 특히 시편의 형태를 유지하고 표면 손상을 최소화하면서 물질 전달에 의한 원소의 변화를 표면으로부터 깊이 방향으로 측정하는 기법은 XRD와 같은 기존의 원소 분석 방법으로는 비효율적이다. 최근 정밀 비접촉 측정 기법의 방법으로 레이저 유도플라즈마 분광법(Laser Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS)을 적용한 원소의 비접촉 3차원 측정방법이 연구 보고되어 왔다^[8-11]. 레이저는 비접촉 고밀도 에너지원으로 재료 표면에 어블레이션(ABL)을 통해 플라즈마를 발생시킬 수 있다. 이렇게 발생된 플라즈마는 재료의 원소 특성에 따라 분광하여 그 원소 분포의 특성을 추적할 수 있다. 이러한 원리를 이용하면 재료의 파괴 없이 재료표면과 재료내부에서의 원소 분포 특성을 공간적으로 분석가능하다.

본 연구에서는 레이저 유도 플라즈마 분광(LIBS) 측정 기법을 이용하여 마찰 금속간 확산에 의한 발생 물질 전달 분석을 진행하였다. 세부적으로 마찰 표면에서 물질 전달을 통한 확산계수를 LIBS를 이용하여 측정하였으며 이를 통해 마찰 재료에 있어서의 표면 특성 변화를 확인하였다. 본 연구에 사용된 재료는 마찰면의 특성을 가지고 있는 브레이크 패드와 로터이다. 이들의 마이크로 표면 형상 측정을 통해 물질 전달에 의한 거칠기 영향을 검증하였으며 물질 확산계수를 모델링 및 측정하여 주요 영향 인자 원소를 확인하였다.

2. 실험 장치

실험을 위해 마찰이 발생된 브레이크 패드와 로터를 사용하였다. 로터 표면의 원소 용착 현상과 확산 접합에 의한 표면 거칠기 변화를 알기 위해 표면조도 형상 측정기를 이용하였다. 사용된 레이저 유도 플라즈마 분광분석장비(RT100, Applied Spectra)의 실험 장치는 Fig. 2와 같다. 장비에 사용된 레이저는 1064 nm 파장의 Nd:YAG 펄스레이저이며, 펄스당 에너지 80 mJ, 펄스폭은 5 ns, 빔 스폿사이즈는 100 μm 의 특성을 가지고 있다. 장치 내에서 발생된 레이저는 집속렌즈를 통해 재료에 조사되며 표면에서 어블레이션에 의해 발생된 플라즈마의 원자 스펙트럼 피크신호는 5채널 CCD로 분석된다. 대표 물질의 원자 피크 신호(Atomic Peak)과 이온 피크 신호(Ionic Peak)가 독립적으로 측정되었으며 레이저 조사에 따른 마이크로 홀의 발생으로 재료의 안쪽 깊이 방향으로의 물질 전달된 원소의 분포를 측정할 수 있었다. 이렇게 측정된 스펙트럼 데이터를 통해 재료의 물질 확산계수(D)를 계산하였다.

LIBS는 재료의 성분 분석을 목적으로 하는 분석 방법이다. 레이저가 재료 표면에 조사되어 어블레이션이 일어나며 이 때 재료 표면의 여러 원소들이 플라즈마 형태로 존재하게 된다. 플라즈마 내의 들뜬 상태의 원소들이 바닥상태로 안정화될 때 각 원소 고유의 분광선이 방출되고, 이 분광선을 검출기

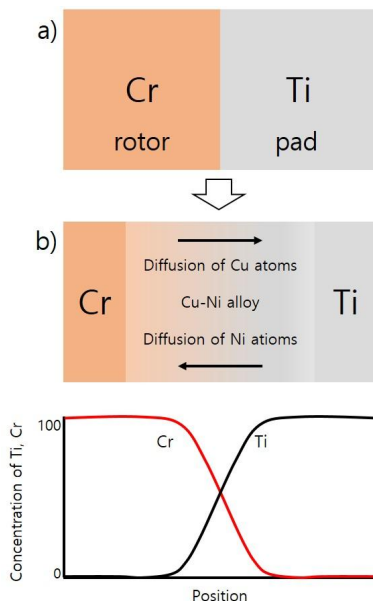


Fig. 1 Example of mass transfer on solid boundary surfaces of Cr and Ti

가 수집하여 스펙트럼 신호를 구성한다. 이러한 스펙트럼 신호 측정 분석을 통해 재료 원소의 정성, 정량 성분 분석 수행하였다. 이러한 스펙트럼 신호는 재료의 물리적 구조 형상에 의해서도 달라질 수 있으며 이를 이용하여 대상 물질의 특성뿐만 아니라 기계적 성질 또한 파악 할 수 있다^[12-14].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표면 거칠기

Fig. 3은 마찰 후 로터의 표면을 50배 배율로 관찰한 결과이다. 확산된 원소가 표면 융착에 의해 떨어져나가 약 200 μm 의 직선형 피크(Pits)가 발생한

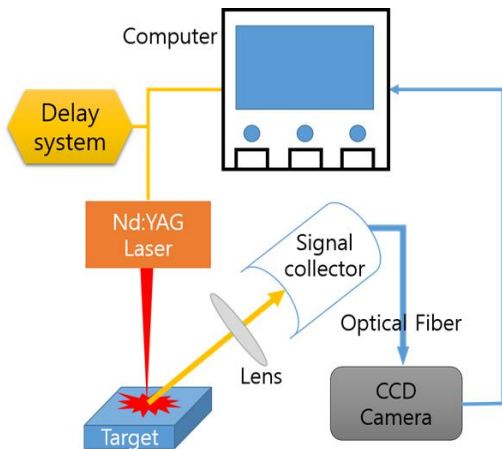


Fig. 2 Schematic of LIBS setup

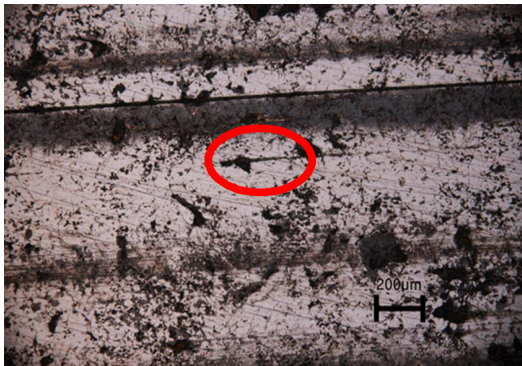


Fig. 3 Pits and scratch on the rotor surface

것을 관찰할 수 있다. Fig. 4는 마찰 전, 후 로터의 거칠기를 비교한 것으로 사용 후 로터의 표면이 사용 전보다 거칠어진 것을 확인할 수 있다. 고속의 금속 마찰면에서 발생한 열에 의해 마멸 파편이 반대쪽 금속면에 물질 전달이 진행되어 표면 거칠기의 정도가 커진 것을 보여준다.

3.2 레이저 플라즈마 피크 신호 분석

Fig. 5는 LIBS장치 내에서 레이저 어블레이션에 의한 로터 표면에서의 스폿의 형상이며 직경은 약 50 μm 로 나타났다. Fig. 6는 LIBS분석을 통해 도출된 원 시편 및 마찰 시편의 금속 원소별 원자 피크(Atomic Peak)와 이온피크(Ionic Peak)의 파장별 스펙트럼 신호 형상이다. 패드에서 로터로 확산된 원소를 피크 신호 데이터베이스를 바탕으로 확인할 수 있었으며, 원 시편에 비해 마찰 시편 표면에서 패드의 원소들의 검출량이 높아진 것을 통해 브레이크 패드와 로터가 서로 마찰되며 로터 표면으로 브레이크 패드 금속 원소들의 물질 확산이

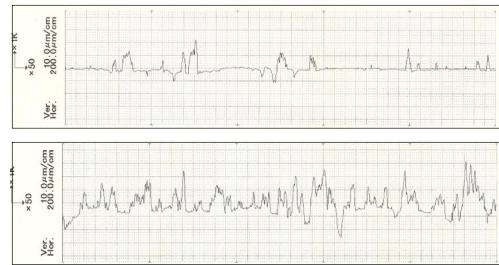


Fig. 4 Surface roughness of the rotor, baseline (up) and friction effect (down)

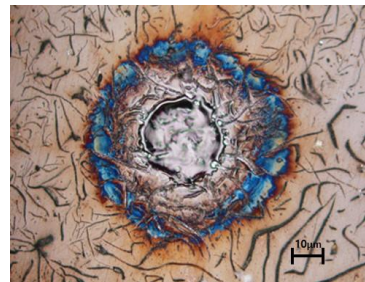


Fig. 5 Spot of laser ablation by LIBS

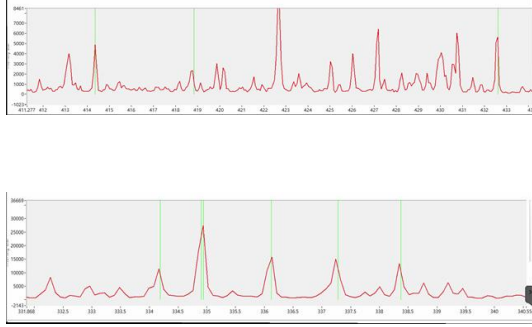


Fig. 6 Peak Ratio at the rotor surface before and after friction

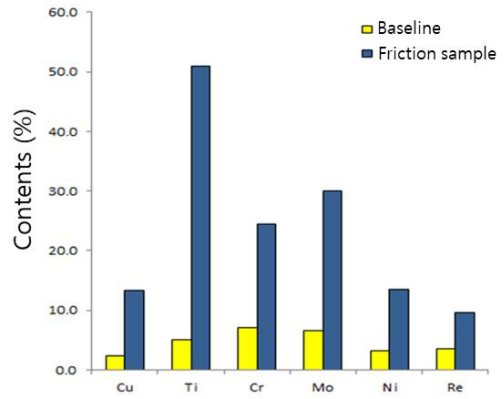
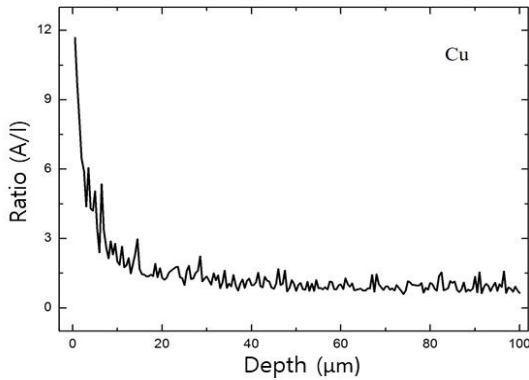
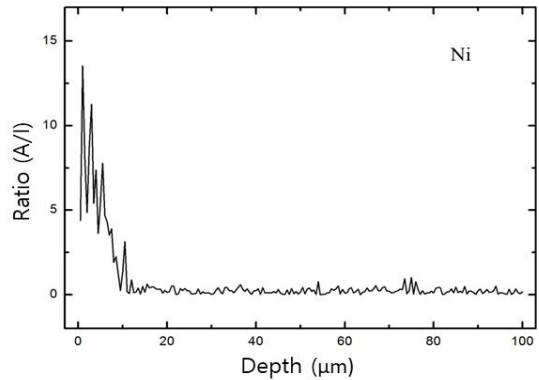


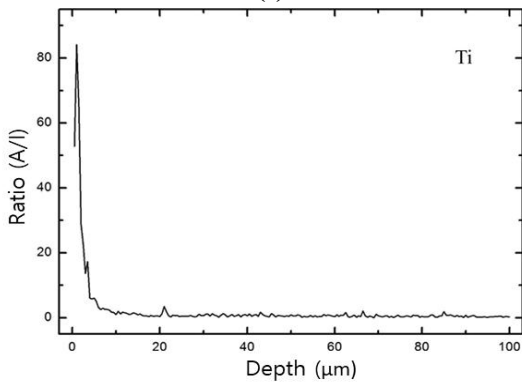
Fig. 7 Comparison of contents of metal elements in rotor surface



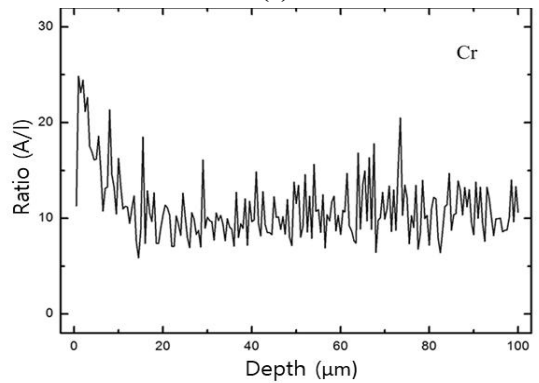
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Distribution profiles of (a) Cu, (b) Ni, (c) Ti, and (d) Cr elements in the depth direction

발생된 것으로 분석이 가능하다(Fig.7).

Fig. 8은 Fig. 7 에서 추적한 원소 중 Cu, Ni, Ti, Cr 의 재료의 깊이 방향(x축)에 따라 피크 신호 강도 (y축)를 원자 피크와 이온 피크의 비율로 나타낸 것이다. 이 그래프에서, 오른쪽으로 갈수록 신호 강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 로터 표면으로 전달된 금속 원소들이 표면에서 깊이 방향으로 확산되었다는 것을 보여준다. 대부분의 금속원소는 표면에서부터 10 ~ 30 μm 의 깊이까지 확산이 진행되다가 그 이상의 깊이에서는 확산이 이루어지지 않은 것으로 관찰되었다.

고체 재료에 대한 확산 강도의 분석을 위해 일반적으로 정상상태의 물질확산을 모델링할 수 있으며 픽의 제 1 법칙(Fick's First Law)에 의해 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

여기서 J 는 확산흐름, D 는 확산계수, C 는 농도, x 는 깊이를 나타낸다. 확산흐름은 농도 구배에 비례하며 확산계수는 상수로 나타난다.

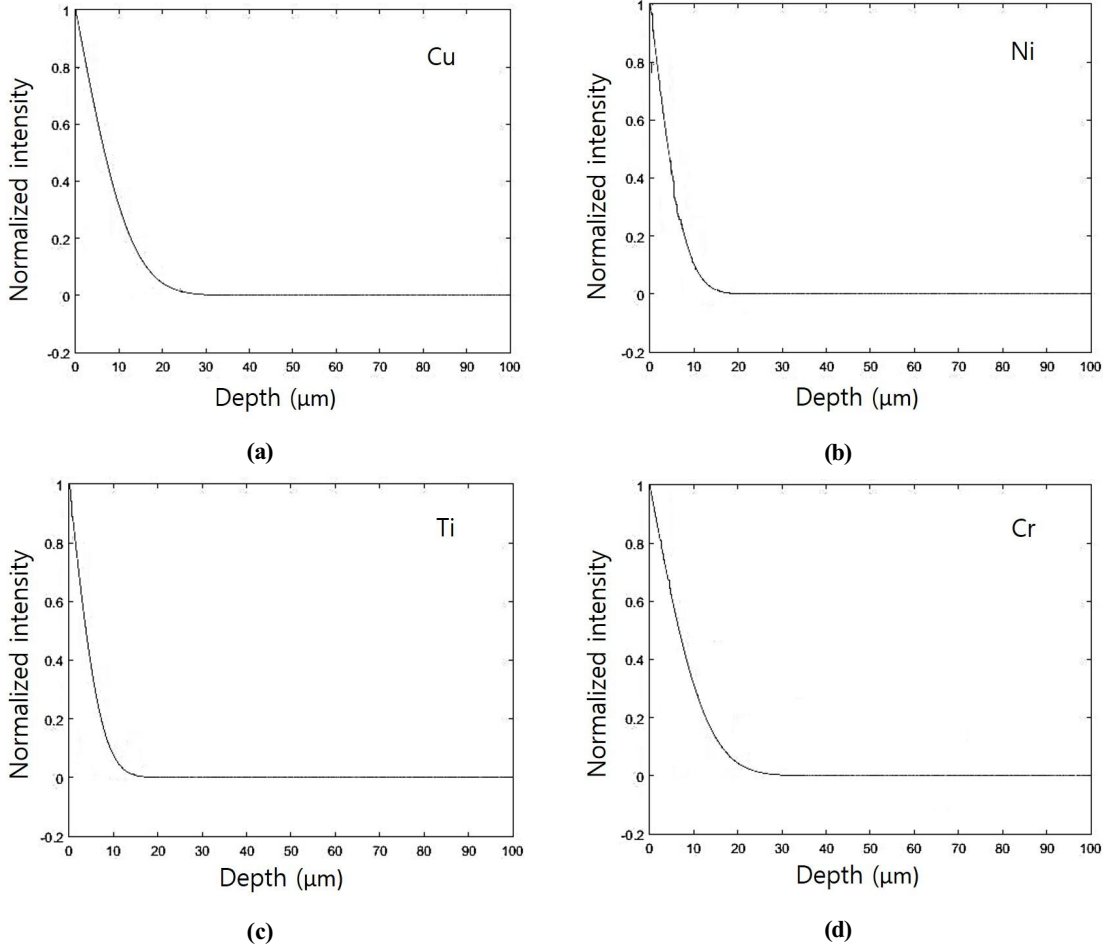


Fig. 9 Normalized concentration distributions of (a) Cu, (b) Ni, (c) Ti, and (d) Cr elements for erf function fitting

확산흐름과 농도구배를 알면 확산계수 D (m^2/s)를 구할 수 있다. 비정상상태의 물질확산은 픽의 제 2 법칙 (Fick's Second Law)으로 모델링할 수 있으며 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

식 (2)의 해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{C(x,t) - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3)$$

여기서 C_0 는 초기농도, C_s 는 최종적으로 수렴된 농도, $C_{(x,t)}$ 는 x 깊이에서 t 초 후의 농도이다.

이와 같은 모델링을 통해 앞서 측정된 확산 강도 분석을 수행하였다. Fig. 9는 앞서 측정된 원자 피크 강도 데이터를 ERF 함수로 변환한 그래프이다. 이 그래프를 통해 깊이방향에 따른 해당 원소의 확산계수 D 를 구할 수 있다. Fig. 9를 통해 나타난 확산계수 D 는 Cu의 경우 $5.6369 \times 10^{-16} m^2/s$, Ni의 경우 $7.4266 \times 10^{-16} m^2/s$, Ti의 경우 $6.2859 \times 10^{-16} m^2/s$, Cr의 경우 $1.9484 \times 10^{-15} m^2/s$ 로 Cr의 확산계수가 가장 크게 나타났다(Fig. 10). 실험에 적용된 확산 시스템에서 Cr의 영향이 가장 크게 나타나는 것으로 결론 내려질 수 있

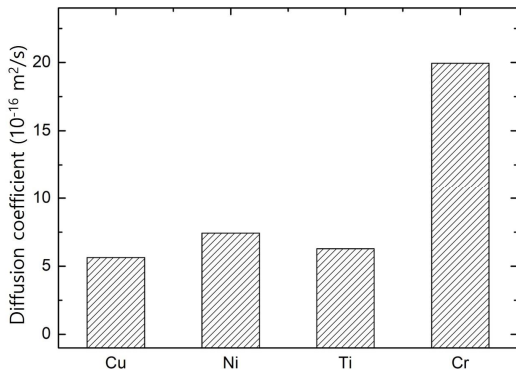


Fig. 10 Diffusion coefficients of the metal elements

으며 이는 재료 표면의 물리적 상태 및 재료 내부의 화학적 조성에 상대적으로 큰 효과를 미친다고 할 수 있다.

4. 결론

마찰면인 브레이크 패드와 로터에서 일어나는 표면 거칠기 변화 요인과 확산 물질의 관계가 LIBS 측정 기법을 통해 분석되었다. 확산되어 용착된 금속이 외력에 의해 떨어져 나간 결과, 표면에 피츠(Pits)가 발생해 로터의 표면 거칠기에 영향을 주었다. 패드와 로터의 마찰에 의한 용착이 관찰되었으며 마찰면에서 물질전달이 측정되었다. 패드에서 로터로 전달된 금속 원소는 대표적으로 Cu, Ni, Ti, Cr이 있으며 각각의 원소들은 모델링을 통해 확산 특성을 분석하였으며 금속 원소별 확산계수(D)를 측정하여 확산 강도를 도출하였다. 물질 전달된 금속원소 중 Cr의 확산 계수가 가장 크게 나타났으며 이는 이와 같은 시스템에서 특정원소의 물질전달에 의해 재료의 물리적 및 화학적 특성이 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 2016-2017 교내연구지원사업에 지원을 받음.

REFERENCES

1. Woong, H. Y., "A study on the production process and wear life distributions of brake pads for passenger cars," Journal of the Korean Data and Information Science Society, Vol. 20, No. 3, pp. 485-492, 2009.
2. Byun, J. Y., Lee, C. J., Jang, J. S., Choi, W. S., "Fundamental Behavior Analysis of SCM440 Steel on Fiction and Wear," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process

- Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 74-80, 2016.
3. Chung, K. H., Yoon, J. K., Kim, H., Kahng, S. J., "Surface Diffusion Coefficients of Adatoms on Strained Overlayers," Journal of the Korean Vacuum Society, Vol. 17, No. 5, pp. 381-386, 2008.
 4. Ryu, M. R., Bae, H. E., Kim, H. S., Lee, D. H., Lee, S. B., Park, J. H., "A Study on Braking Performance of Break Disc," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 3, pp. 13-20, 2013.
 5. Ryu, M. R., Lee, D. H., Lee, S. B., Park, J. H., Shim, J. J., "Study on Performance Experiment and Analysis of Aluminum Disc Brake," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 6, pp. 60-68, 2013.
 6. Terheci, M., Manory, R. R., Hensler, J. H., "The friction and wear of automotive grey cast iron under dry sliding conditions Part 1-relationships between wear loss and testing parameters," Wear, Vol. 180, No. 1-2, pp. 73-78, 1995.
 7. Terheci, M., Manory, R. R., Hensler, J. H., "The friction and wear of automotive grey cast iron under dry sliding conditions Part 2. Friction and wear-particle generation mechanisms and their progress with time," Wear, Vol. 185, No. 1-2, pp. 119-124, 1995.
 8. Choi, S. H., Kim, C. S., Jhang, K. Y., Shin, W. S., "Influence of Surface Roughness on Morphology of Aluminum Alloy After Pulsed-Laser Irradiation," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 9, pp. 1105-1111, 2011.
 9. El Haddad, J., Canioni, L., Bousquet, B., "Good practices in LIBS analysis: Review and advices," Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Vol. 101, pp. 171-182, 2014.
 10. Sallé, B., Cremers, D. A., Maurice, S., Wiens, R. C., "Laser-induced breakdown spectroscopy for space exploration applications: Influence of the ambient pressure on the calibration curves prepared from soil and clay samples," Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Vol. 60, No. 4, pp. 479-490, 2005.
 11. Kim, J., Ko, C., "Non-contact Measurement and Analysis of Surface Hardness on Welding Steel Using Laser-induced Breakdown Spectroscopy," Journal of The Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 141-148, 2014.
 12. Kang, D., Kim, J., "Hardness Analysis of Surface Treated Magnesium Alloy using Laser Induced Breakdown Spectroscopy," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 24, No. 6, pp. 625-631, 2015.
 13. Kang, D., Kim, J., "A Study on the Corrosion Characteristics of a Metal Surface by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy," Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 16, No. 1, pp. 83-89, 2017.
 14. Yoon, S., Kang, D., Kim, J., "Laser Surface Treatment of Manesium Alloy using ZrO2 for Corrosion Resistance," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 93-100, 2016.