

고온 환경에서 합금의 마모 및 마찰 특성에 관한 연구

최승윤¹ · Narguess Nemati¹ · 김대은^{2,*}

¹연세대학교 대학원 기계공학과, ²연세대학교 기계공학과

A Study on Wear Properties of Alloys in High Temperature Condition

S.Y. Choe¹, Narguess Nemati¹ and D.E. Kim^{2,*}

¹Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

²Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received November 15, 2018; Revised January 16, 2019; Accepted January 25, 2019)

Abstract – In this work we investigated the friction and wear characteristics of a magnesium alloy, which has been receiving much attention as a light metal in industrial applications such as automobiles and aerospace. Magnesium is one of the lightest structural material that has high specific strength, lightweight, low density and good formability. However, current issue of using magnesium alloy is that magnesium has weakness against temperature. As the temperature increases, magnesium undergoes poor creep resistance and ease of softening, and therefore, its mechanical strength decreases sharply. To solve this issue, a new type of magnesium alloy that retains high strength at high temperature has been proposed. The tribological behavior of this alloy was investigated using a tribotester with reciprocating motion and heating plate. A stainless steel ball was used as a counter surface. Results showed that extrusion process has similar wear behavior to the commonly used casting process but retains good mechanical strength and durability. The presence of an alloying element enhanced the wear properties especially in high temperature. This study is expected to be utilized as fundamental data for the replacement of high density materials currently used in mechanical industries to a much lighter and durable heat-resistant materials.

Keywords – alloy (합금), friction (마찰), high temperature condition (고온 환경), lubrication (윤활), wear (마모)

1. 서 론

마그네슘 합금은 높은 비강도, 낮은 밀도, 우수한 성형성의 특성을 가지고 있기에 자동차나 항공우주산업에서 활발하게 사용된다[1]. 최근에는 경량화에 초점을 둔 제품들이 많아지면서 기존 알루미늄이나 다른 합금으로 구성된 부품들을 마그네슘 합금으로 대체하는 연구가 진행되고 있다[2, 3]. 특히, 여러 기계산업에서 핵심적으로

이용되는 엔진 부품은 고성능을 낼수록 열이 많이 발생하며 열에 의한 변형을 방지하기 위해 무거운 무게에도 불구하고 내열성이 강한 합금을 사용한다. 이에 반해 마그네슘은 열에 의해 쉽게 변형되기 때문에 고온환경에서 쓰이는 기계 부품에 이용되지 않는다[4, 5]. 마그네슘의 이러한 단점을 해결하기 위해 본 연구에서는 새로운 조합의 마그네슘 합금을 제작하여 가볍지만 우수한 내열성을 지닌 합금을 제시하고자 한다. 또한 고온에서 트라이볼로지적 특성 평가를 통해 고온 환경에서 작동하는 기계부품에 적용 가능성을 파악하였다.

기존 연구에 의하면 다른 마그네슘 합금에 비해 Mg-Al-Ca 조합의 합금이 내열성이 우수한 금속간 화합물이

*Corresponding author: kimde@yonsei.ac.kr
Tel: +82-2-2123-2822, Fax: +82-2-365-0491
<http://orcid.org/0000-0002-6095-5138>

© 2019, Korean Tribology Society

형성되어 고온환경에서도 고강도를 유지할 수 있다. 또한 본 연구에서 사용한 extrusion 공정은 합금 용액이 최저 온도에서 용해하는 eutectic network를 끊어 기존 cast 공정에 비해 인장강도와 내구성을 향상시킨다[6-8]. 따라서 본 연구에서는 extrusion 공정을 통해 합금을 제작하고 기존에 널리 쓰이는 cast 방법으로 가공된 합금과 내마모성을 비교하여 기존 합금을 대체할 수 있는 가능성을 파악하였다.

또한 최근 발표된 연구에 의하면 마그네슘 합금을 강화시키는데 효율적인 원소로 가돌리늄(Gd)이 주목받고 있다[9-11]. 가돌리늄이 첨가된 합금의 우수한 강도와 내화학적 등에 대한 연구 결과가 보고되었으며 본 연구에서는 가돌리늄이 첨가된 마그네슘 합금을 가공하여 고온 환경에서 트라이볼로지적 특성을 파악하였다.

2. 연구방법 및 내용

2-1. 시편 준비

Extrusion 공정의 합금의 강도 및 트라이볼로지적 특성 향상을 파악하기 위해 extrusion과 as-cast 방식으로 시편을 제작하였다. 그리고 마그네슘 합금에 가돌리늄을 첨가하여 고온 환경에서 내마모 특성을 파악하기 위해 가돌리늄이 첨가된 마그네슘 합금을 제작하였다. 이 합금들은 University of Tehran에서 가공되었다.

Table 1에 나타난 시편은 커버 가스(5%SF₆+CO₂)로 보호된 유도 용광로를 사용하여 마그네슘을 흑연 도가니에서 용해하여 제작하였다. 합금시편을 제작하기 위해 Mg-50wt%Al 소재를 770°C에서 액체상태의 마그네슘(99.92%)에 첨가하였다. 흑연 막대로 섞은 후, Mg-

20wt%Ca 소재를 750°C에서 첨가하였다. 마지막으로, 100°C로 예열된 실린더 모양의 구조틀로 용해 합금을 부었다. 그 후 상온까지 식힌 구조틀을 직경 8 mm, 길이 5 mm로 절단하여 14A-CAST 시편을 제작하였다. Cast 시편을 제작하고 남은 합금은 extrusion 컨테이너에 들어갈 수 있도록 직경 30 mm, 길이 30 mm의 막대모양으로 가공하였다. Extrusion 공정 전 샘플들에 400°C로 24시간 동안 열을 가하고 용광로에서 천천히 상온으로 식혔다. 이후, 합금을 extrusion 컨테이너에서 450°C의 온도, extrusion 비율 12:1, 10 mm/s의 속도로 수압식으로 밀어내어 시편을 제작하였다. 이렇게 만들어진 14A-EXT 시편의 최종 크기는 직경 8 mm, 두께 5 mm로 가공되었다.

Table 2에 명시한 시편들은 위와 같은 extrusion 공정을 통해 제작되었고, Mg-20wt%Ca 대신 Mg-50wt%Zn와 Mg-10wt%Gd이 다양한 혼합 비율로 첨가되었다. 최대 가돌리늄의 혼합 비율은 4.8%인데, 이는 가돌리늄 혼합 비율 4.8%일 때 extrusion 공정에서 eutectic network를 끊어주는 온도가 가장 낮은 상태이기 때문이다. 따라서 가돌리늄 혼합 비율 4.8%의 합금이 이론적으로 가장 이상적인 공정으로 가공되었다고 생각할 수 있다. 또한 이 합금들의 구성은 알루미늄과 가돌리늄의 총 중량퍼센트가 6%로 유지되면서 서로의 상호 작용 효과에 중점을 두었다. 이에 따라 GZ61(Mg-6Gd-1Zn) 합금에서 가돌리늄을 알루미늄으로 대체했을 경우의 intermetallic compound의 변화와 그 효과를 알아볼 수 있었다.

모든 시편의 후처리 공정으로 연마, 광택 작업이 이루어졌으며 Fig. 1은 실제 시편의 사진으로, 직경 8 mm, 두께 5 mm이다.

Table 1. Extruded and casted sample preparation

| Name | Nominal Composition | Condition | Phases |
|----------|---------------------|-----------|---------------------------------|
| 14A-EXT | Mg-14%Al-11%Ca | Extruded | α -Mg+Al ₂ Ca |
| 14A-CAST | Mg-14%Al-11%Ca | As-cast | α -Mg+Al ₂ Ca |

Table 2. Gadolinium added sample preparation

| Name | Nominal Composition | Phases |
|------|-----------------------|---------------------------------------------------------|
| 0% | Mg-6%Al-1%Zn(AZ61) | α -Mg+Mg ₁₇ Al ₁₂ |
| 2% | Mg-2%Gd-4%Al-1%Zn | α -Mg+Al ₂ Gd |
| 4% | Mg-4%Gd-2%Al-1%Zn | α -Mg+(Mg,Al) ₃ Gd+Al ₂ Gd |
| 4.8% | Mg-4.8%Gd-1.2%Al-1%Zn | α -Mg+(Mg,Al) ₃ Gd |



Fig.1. Picture of actual specimen.

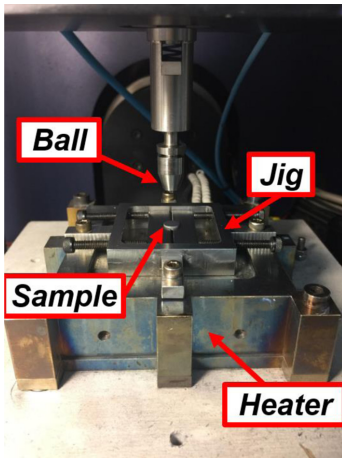


Fig. 2. Reciprocating-type high temperature tribotester.

2-2. 윤활제 준비

마그네슘 합금은 자동차, 항공우주산업 등에서 핵심적으로 사용되는 기계부품인 엔진에 주로 이용되기 때문에 윤활유는 엔진오일을 사용하였다. 윤활유는 매 실험 전 시편 위에 주사기를 이용하여 직접 도포하였다.

2-3. 마찰 실험 준비

고온환경에서 트라이볼로지적 특성을 파악하기 위해 heating plate가 달려있는 ball-on plate 형식의 왕복운동형 고온 마찰시험기를 사용하였다. 본 실험 장치의 구성은 Fig. 2와 같다. Heating plate 위에 시편 크기에 맞춰 지그를 제작하였고 상대면으로는 5 mm의 SUS304 볼을 사용하여 20 N의 수직하중을 인가하였다. Pretest를 진행하여 마찰 계수가 steady-state인 구간을 파악하였으며 600회의 반복횟수로 마찰 실험을 진행하였다. 또한 모든 실험은 각 시편 종류마다 세 번씩 반복실험하였다. 자세한 실험 조건은 Table 3에 명시되어 있다.

Table 3. Friction test condition

| Condition | Value |
|---------------------------|--------------|
| Normal Load | 20 N (2 kgf) |
| Sliding Speed | 2.5 mm/s |
| Sliding Stroke | 2.5 mm |
| Cycle | 600 cycles |
| Temperature | 25~250°C |
| Humidity | ~40% |
| Lubricant Type | Engine oil |
| Repeating each experiment | 3 times |

3. 결과 및 고찰

3-1. 마찰 계수 측정 결과

3-1-1. Ext와 cast 시편의 마찰 계수

14A-EXT 시편과 14A-CAST 시편으로 윤활 실험을 진행하고, 비교를 위해 SUS 304 시편을 동일조건에서 실험하여 비교하였다. 먼저 상온에서는 Fig. 3(a)와 같이 세 시편 모두 마찰 계수의 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 실험 온도가 높아지면서 제작된 합금시편에서 SUS보다 낮은 마찰 계수를 나타내었다. 200°C부터는 full로 extruded된 시편과 cast 시편의 마찰 계수가 다른 온도에서의 마찰 계수 값에 비해 높고, 반복 횟수에 따라 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 산화에 의한 마모 가속화로 보여진다. 시편에 도포된 윤활유의 색이 200°C 실험에서는 검정색이 된 것을 확인할 수 있었다. 엔진 오일이 검게 변하는 것은 일정 온도가 가해졌을 때 탄소의 화학 결합이 산화되어 생기는 현상이며 이는 실제 자동차 엔진에서도 똑같이 발생하는 현상이다. 평균 마찰 계수 값은 Table 4에 나타내었다.

3-1-2. 가돌리늄 혼합 비율 0~4.8%의 마찰 계수

가돌리늄 혼합 비율 0~4.8%로 제작된 마그네슘 합금 시편들로 윤활 실험을 진행하고, SUS 304 시편을 동일 조건에서 실험하여 상대 비교하였다. 상온에서부터 150°C까지의 마찰 계수는 온도에 따라 큰 변화가 없다가, 200°C부터 시편에 따라 다른 경향을 나타내었다. Fig. 4(d) 200°C와 (e) 250°C에서 가돌리늄 비율 4.8% 시편이 가장 낮은 마찰 계수를 나타내었다. 이는 앞서 설명한 가돌리늄의 혼합 비율이 4.8%일 때 extrusion 공정 동안 가장 효율적으로 eutectic network를 끊으며 다른 시편들보다 향상된 트라이볼로지적 특성을 나타낸 것

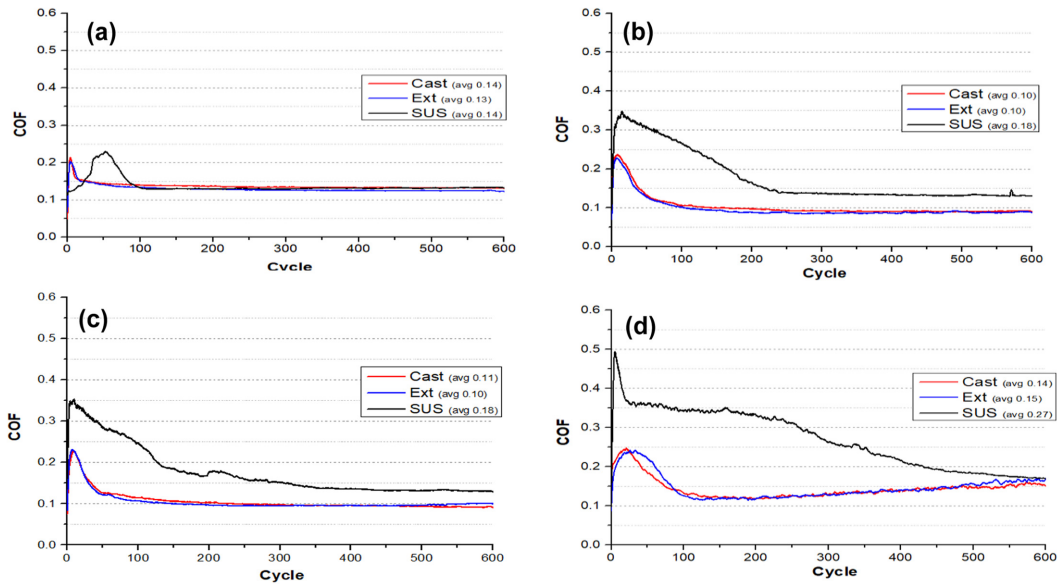


Fig. 3. Friction coefficient graph for ext, cast and SUS samples in (a) room temperature, (b) 100°C, (c) 150°C and (d) 200°C.

Table 4. Friction coefficients of ext. and cast alloys

| Temp | 14A-CAST | STD | 14A-EXT | STD |
|-----------|----------|--------|---------|--------|
| RT (25°C) | 0.14 | 0.0033 | 0.13 | 0.0032 |
| 100°C | 0.11 | 0.0084 | 0.10 | 0.0021 |
| 150°C | 0.10 | 0.0010 | 0.10 | 0.0026 |
| 200°C | 0.14 | 0.0260 | 0.15 | 0.0327 |

Table 5. Friction coefficients of 0~4.8 Gd samples

| Gd % | 0% | 2% | 4% | 4.8% | SUS |
|-----------|------|------|------|------|------|
| RT (25°C) | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| 100°C | 0.13 | 0.13 | 0.12 | 0.14 | 0.18 |
| 150°C | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.18 |
| 200°C | 0.22 | 0.18 | 0.23 | 0.15 | 0.27 |
| 250°C | 0.20 | 0.18 | 0.21 | 0.16 | |

로 생각된다. 250°C에서도 이러한 특성이 나타난다. 300°C 이상의 온도 조건에서는 엔진 오일이 빠르게 증발하기 때문에 의미 있는 실험 결과를 얻을 수 없었다. 최대 250°C에서 진행된 마찰 실험을 통해 기틀리늄 합금에 의한 고온에서의 트라이볼로지적 특성을 파악할 수 있었다. 평균 마찰 계수 값은 Table 5에 명시되어 있다.

3-2. 마모율 측정 결과

3-2-1. Fully Extruded 시편과 cast 시편의 마모율

실험 후에 아세톤과 에탄올로 세척된 시편 표면을 3D 공초점 레이저 현미경으로 분석하였다. 해당 장비는 Fig. 5와 같이 각 시편의 마모 면적을 구할 수 있으며, 이 마모 면적을 이용하여 다음의 식으로 마모율을 구할 수 있다.

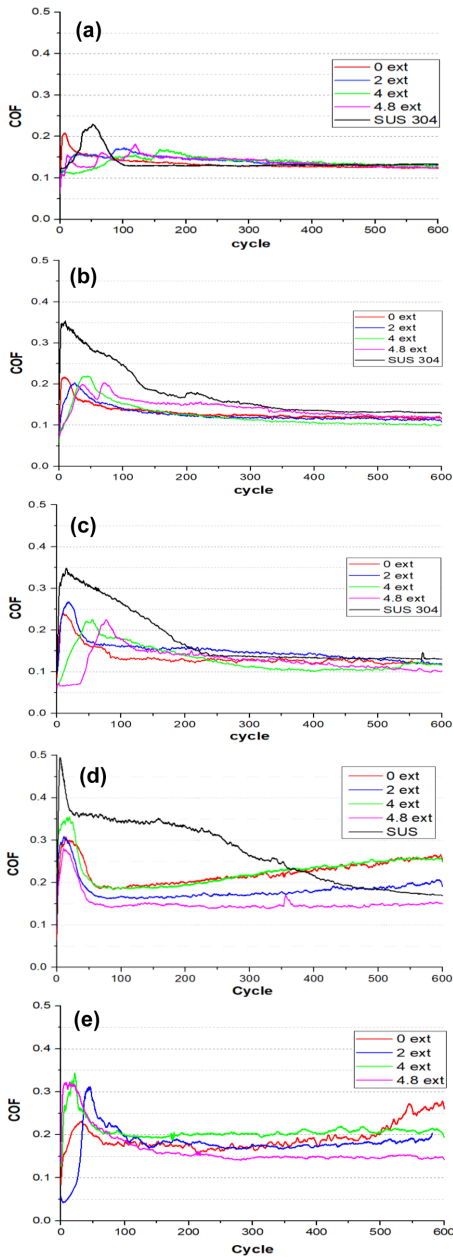


Fig. 4. Friction coefficient graph for 0~4.8 fully extruded specimen and SUS samples in (a) room temperature, (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C and (e) 250°C.

$$\text{Wear Rate} = V / (F \cdot L) \quad (\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{mm})$$

$$V: \text{wear volume} = \text{wear area} \times \text{stroke} \quad (\text{mm}^3)$$

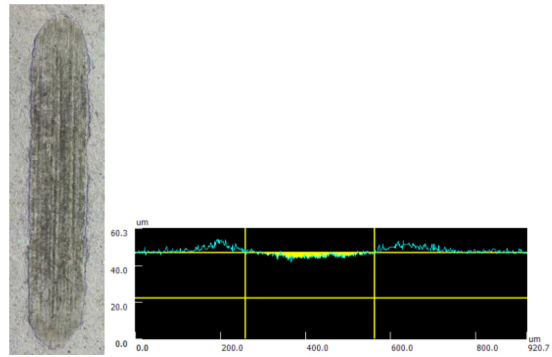


Fig. 5. Example of surface of one of the samples and its wear area measurement.

Table 6. Wear rate table of cast and fully extruded specimen

| Wear rate (mm ³ /N·mm) | 14A-CAST | 14A-EXT |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| RT (25°C) | 1.8×10 ⁻⁸ | 2.2×10 ⁻⁸ |
| 100°C | 6.7×10 ⁻⁸ | 4.6×10 ⁻⁸ |
| 150°C | 1.0×10 ⁻⁷ | 8.3×10 ⁻⁸ |
| 200°C | 9.2×10 ⁻⁸ | 1.1×10 ⁻⁷ |

F: normal load (N)

L: sliding distance = sliding speed × cycle (mm)

이 식을 이용하여 계산한 마모율을 Table 6에 나타내었다.

As-cast와 extrusion으로 제작된 시편은 마찰 계수도 비슷하게 나타났으며 마모율에서도 비슷한 값을 나타내었다. Extrusion 공정이 합금의 강도를 높이는 것으로 알려져 있지만 트라이볼로지적 특성에는 as-cast와 큰 차이를 나타내지 않았다. Extrusion과 as-cast로 제작된 시편은 모두 온도의 증가에 따라 마모율이 증가하였다.

3-2-2. 가돌리늄 혼합 비율 0~4.8% 합금의 마모율

위와 같은 방법으로 가돌리늄 혼합 비율 0~4.8%로 제작된 합금 시편들의 마모율을 계산하여 Table 7에 나타내었다. 마찬가지로 온도가 올라갈수록 마모율이 증가하였고, 마찰 계수가 낮게 측정되었던 가돌리늄 비율 4.8% 합금 시편도 마모율은 다른 시편들과 큰 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Table 7. Wear rates 0~4.8 Gd samples

| Wear rate (mm ³ /N·mm) | 0% | 2% | 4% | 4.8% |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| RT (25°C) | 7.5×10 ⁻⁸ | 7.9×10 ⁻⁸ | 1.0×10 ⁻⁷ | 1.2×10 ⁻⁷ |
| 100°C | 1.9×10 ⁻⁷ | 1.7×10 ⁻⁷ | 2.1×10 ⁻⁷ | 2.0×10 ⁻⁷ |
| 150°C | 2.0×10 ⁻⁷ | 2.4×10 ⁻⁷ | 3.9×10 ⁻⁷ | 2.6×10 ⁻⁷ |
| 200°C | 5.8×10 ⁻⁷ | 6.4×10 ⁻⁷ | 9.0×10 ⁻⁷ | 7.1×10 ⁻⁷ |
| 250°C | 1.2×10 ⁻⁶ | 1.5×10 ⁻⁶ | 1.9×10 ⁻⁶ | 1.7×10 ⁻⁶ |

4. 결 론

본 연구에서는 마그네슘 합금의 공정에 따른 마찰, 마모 특성을 파악하였으며 가돌리늄 혼합 비율을 달리하며 제작된 합금의 고온에서의 트라이볼로지적 특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

Extrusion 공정으로 제작된 합금 시편은 as-cast 공정으로 제작된 합금보다 높은 강도를 지니는 것으로 알려져 있으나 마찰, 마모 특성은 유사하게 나타났다.

가돌리늄이 첨가된 마그네슘 합금의 우수한 내마모 특성은 200°C 이상의 환경에서 명확히 나타났다.

실험한 마그네슘 합금에서의 가돌리늄 함량이 증가할수록 낮은 마모 계수와 내마모성이 증가한다.

이를 통하여 기존의 기계적 산업의 고온환경에서 쓰이는 고밀도의 물질들을 훨씬 가볍고 내마모성 있는 내열성 물질로 대체할 수 있는 연구 결과로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgements

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018289).

이 논문은 2018년도 BK21플러스 사업에 의하여 지원되었음.

References

[1] Guo, C., Yao, R., Kong, H., Chen, J., Zhou, J., "Space tribological properties of metal matrix space lubricant coating prepared on titanium surface," *Surface and Coatings Technology*, Vol.246, pp.40-45, 2014.

[2] El-Morsy, A., "Dry sliding wear behavior of hot deformed magnesium AZ61 alloy as influenced by the sliding conditions", *Mater. Sci. Eng. A-Struct.*

Mater. Prop. Microstruct. Process., Vol.473, Nos.1-2, pp.330-335, 2008.

- [3] Blau, P. J., Walukas, M., "Sliding friction and wear of magnesium alloy AZ91D produced by two different methods", *Tribol. Int.*, Vol.33, No.8, pp.573-579, 2000.
- [4] Liu, T., Pan, F., Zhang, X., "Effect of Sc addition on the work-hardening behavior of ZK60 magnesium alloy", *Mater. Des.*, Vol.43, pp.572-577, 2013.
- [5] Wang, X., Du, W., Liu, K., Wang, Z., Li, S., "Microstructure, tensile properties and creep behaviors of as-cast Mg-2Al-1Zn-Gd (x=1, 2, 3, and 4wt.%) alloys", *J. Alloy. Compd.*, Vol.522, pp.78-84, 2012.
- [6] Nemati, N., Emamy, M., Penkov, O. V., Kim, J. K., Kim, D. E., "Mechanical and high temperature wear properties of extruded Al composite reinforced with Al13 Fe4 CMA nanoparticles," *Materials & Design*, Vol.90, pp.532-544, 2016.
- [7] Wang, W., Zeng, W., Sun, Y., Zhou, H., Liang, X., "Microstructure, tensile, and creep behaviors of Ti-22Al-25Nb (at.%) orthorhombic alloy with equiaxed microstructure," *Materials*, Vol.11, No.7, pp.1244, 2018.
- [8] Song, Y., Kim, J. S., Park, S. H., Kim, H., Won, C., Kim, J., Yoon, J., "Hot rolling of flame retardant magnesium and aluminum alloys to produce a cladding plate," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol.19, No.4, pp.521-527, 2018.
- [9] Li, J., He, Z., Fu, P., Wu, Y., Peng, L., Ding, W., "Heat treatment and mechanical properties of a high-strength cast Mg-Gd-Zn alloy," *Materials Science and Engineering: A*, Vol.651, pp.745-752, 2016.
- [10] Raghavan, V., "Al-Gd-Mg (Aluminum-Gadolinium-Magnesium)", *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, Vol.28, No.5, pp.464-468, 2007.
- [11] Zhang, J., Liu, Y., Liu, J., Yu, Y., Wang, S., "The effect of Gd element and solution treatment on the microstructure of AZ31 magnesium alloy and its kinetic model", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.663, pp.610-616, 2016.