

## 마그네슘 합금에 대한 DLC 코팅의 온도에 따른 마찰기구 해석

권혁우<sup>1</sup> · 김명곤<sup>1</sup> · 허하리<sup>1</sup> · 김용석<sup>#</sup>

### Friction Behavior of DLC Coating Slid Against AZ31 Magnesium Alloy at Various Temperatures

H. Gwon, M. G. Kim, H. L. Hur, Y.-S. Kim

(Received August 3, 2015 / Revised September 1, 2015 / Accepted September 17, 2015)

#### Abstract

Sheet-forming of Mg alloys is conducted at elevated temperatures (250°C) due to the low formability at room temperature. The high-temperature process often gives rise to surface damage on the alloy (i.e. galling.) In the current study, the frictional characteristics of DLC coating slid against an AZ31 Mg alloy at various temperatures were investigated. The coating has been used widely for low-friction processes. Dry-sliding friction and galling characteristics of an AZ31 Mg alloy (disk), which slid against uncoated and a DLC-coated STD-61 steel (pin), were investigated using a reciprocating-sliding tribometer at room temperature and 250°C. To represent the real sliding phenomena during a sheet metal forming process, single-stroke tests were used (10mm stroke length) rather than a reciprocating long sliding-distance test. The DLC coating suppressed adhesion between the alloy and the tool steel at room temperature, and exhibited a low friction coefficient. However, during sliding at 250°C, severe adhesion occurred between the two surfaces, which resulted in a high friction coefficient and galling.

**Key Words** : Mg Alloy, Sheet Forming, Friction, Galling, DLC

#### 1. 서론

결정구조가 HCP 구조인 마그네슘 합금은 독립된 슬립계가 부족하여 상온 성형성이 열악하므로, 200~300°C의 높은 온도에서 판재 성형이 이루어진다[1]. 이 같은 온간 또는 고온 성형 중에는 마그네슘 합금 판재와 금형 사이에서 sticking, adhesion, galling 등이 발생하고, 이들은 마그네슘 합금 판재의 표면 품질 저하, 금형의 수명 단축, 생산성 저하 등의 많은 문제를 야기한다. 특히 마그네슘 판재로부터 금형으로의 금속 천이 현상을 포함하는 galling은, 금형으로 천이된 입자가 후속 성형 시 판재를 추가적

으로 손상하여, 판재 연속성형에 가장 큰 장애가 되고 있다. 판재 성형중 발생하는 sticking, galling 문제를 해결하기 위한 방법으로는 고체 또는 액체 윤활제를 사용하는 것과 금형 표면에 마찰계수가 낮은 피막을 코팅하여 이형성을 확보하는 방법들이 제시되고 있다. 저마찰 코팅재로서 가장 많이 활용되고 있는 것 중 하나가 DLC(diamond-like-Carbon) 코팅이다. DLC 코팅을 이용하여 금속재료의 마찰특성을 향상하는 연구가 많은 연구자들에 의해 이루어져왔으나[2~6] 대부분 고강도 steel이나 Al 합금을 상대로 한 연구에 집중되어 있고, 마그네슘 합금을 상대로 한 DLC 코팅의 마찰특성 연구는 부족한 실정이다.

1. 국민대학교 신소재 공학부

# Corresponding Author : School of Advanced Materials and Science, Kookmin University, E-mail: ykim@kookmin.ac.kr

본 연구에서는 Mg 판재 성형에 있어서 DLC 코팅의 적용 가능성을 확인 하기 위해, 마그네슘 합금을 상대로 한 DLC 코팅된 금형재의 마찰특성을 상온과 고온에서 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험소재

시험 소재로 AZ31 마그네슘 합금 판재와 STD-61 합금(마찰 상대재, 열간 금형소재)을 사용하였다. AZ31 합금 판재로부터 두께 4mm, 가로 25mm, 세로 75mm의 시편을 가공하였다. AZ31 합금 판재 시편을 350 °C에서 1 시간 동안 열처리 후 공냉하여, 60.3 HV 경도를 갖게 하였다. STD-61 합금은 1050°C에서 1 시간 동안 열처리 후 공냉하여 55 HRC 의 경도를 갖게 하였다. 미끄럼 상대재인 STD-61 합금 시편은 원통형 disk로 지름 1.2mm, 두께 4mm 로 가공되었다. AZ31 마그네슘 합금 판재와 금형 상대재를 연마하여 마찰 시험 전 초기 표면 조도(Ra)를 0.02 $\mu$ m이하로 고정시켰다.

DLC 코팅은 연마된 STD-61 금형강 표면에 PECVD(plasma enhanced chemical vapor deposition)법으로 증착되었다(㈜ J&L Tech). DLC 코팅의 경도와 표면 조도 (Ra)는 각각 14.98GPa, 0.01 $\mu$ m 로 측정되었다. Fig. 1에 DLC 코팅된 STD-61 합금의 단면을 SEM으로 관찰한 사진을 나타내었다. DLC 코팅층의 두께는 약 2 $\mu$ m였다.

### 2.2 미끄럼 마찰 시험

AZ31 Mg 합금 판재의 galling 기구를 분석하기 위한 마찰시험은 Flat surface-on-disk 형태의 직선 왕복동 마찰시험기(reciprocating sliding wear tester) [7]를 사용하여 수행되었다(Fig. 2). 이 마찰시험기를 사용한 마찰시험은 일반적으로 홀더에 고정된 AZ31 합금 판재 시편(flat surface) 위에 STD-61 합금 시편(disk)을 올려놓고 수직하중을 가한 상태에서 직선 왕복동 운동하는 방식으로 수행된다. 그러나 본 연구에서는 판재 성형 중 금형강과 판재간의 마찰이 일어나는 상황을 모사하기 위하여 왕복동 마찰시험을 행하지 않고 한 쪽 방향으로 1회만 미끄러지는 1-stroke 마찰시험을 행하였으며 이 때의 미끄럼 거리는 10mm로 설정되었다. AZ31 판재 시편이 고정된 홀더 밑에는 heater block을 장착되어있어 홀더와

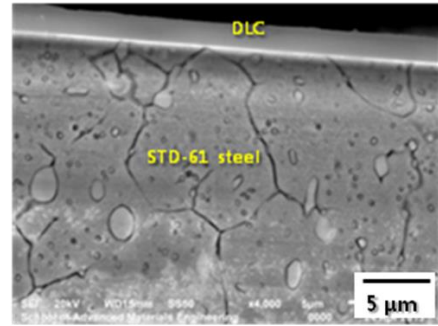


Fig. 1 SEM micrograph of the DLC coating layer on the STD-61 tool steel

판재 시편을 가열할 수 있도록 하였고 열전대(thermocouple)를 사용하여 측정된 AZ31 Mg 합금 판재시편의 표면 온도를 마찰 시험 온도로 하였다. 미끄럼 마찰 시험중의 수직하중(applied normal load)과 미끄럼 속도(sliding speed)는 판재 성형 공정에서 금속 판재에 가해지는 수직 압력과 성형속도의 영향을 고려하여 설정하려 하였으나, 이는 금형과 판재의 접촉 형상에 따라 그 값이 매우 다양하여 이를 모두 고려하는 것은 무리가 있으므로 본 연구에 사용된 마찰 시험 장비에서 가장 높은 마찰력이 측정되는 조건으로 결정하였다. 이를 위하여 코팅되지 않은 STD-61 금형과 AZ31 Mg 합금 판재시편의 예비 마찰 시험을 수직하중과 미끄럼 속도를 달리하며 수행하였다. 이 때의 수직하중과 미끄럼 속도는 본 연구에 사용된 마찰 시험장비에서 설정할 수 있는 최소부터 최대까지 그 범위를 달리하였다(수직하중 50N~400N, 미끄럼 속도 0.2~20mm/s). 예비시험 결과를 통해 수직 하중이 증가할수록, 그리고 미끄럼 속도가 감소할수록 마찰력이 증가하는 것이 확인되었기 때문에 본 연구에서는 400N의 수직하중과 0.2mm/s의 미끄럼 속도로 마찰 시험된 결과를 분석하였다. 모든 마찰시험은 습도가 35 ± 5% 로 유지된 대기 중에서 수행되었고 윤활제는 사용되지 않았다. 미끄럼 마찰 시험 후 측정된 마찰계수를 미끄럼 거리에 따른 선도로 나타내어 분석하였다.

### 2.3 Galling 특성 분석

미끄럼 마찰 시험 후 2차원 표면조도 분석을 통하여 AZ31B 마그네슘 합금 판재의 마찰면 형상을 분석하였다. 또한 AZ31B 마그네슘 합금 판재와 금형소재 표면의 마찰부 미세조직을 광학현미경과 주사

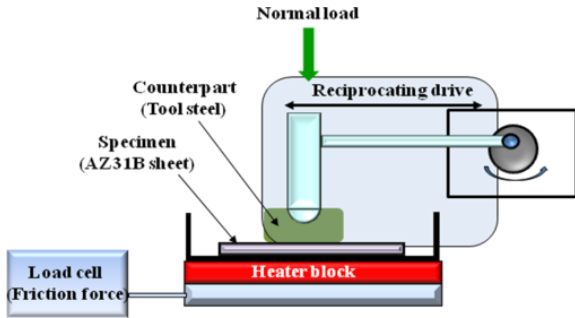


Fig. 2 A schematic diagram of the reciprocating sliding tester used in the present study

전자 현미경(scanning electron microscope) 으로 관찰하고 EDS(energy dispersive spectroscopy) 분석을 행하였다.

### 3. 실험 결과

상온에서 AZ31 마그네슘 합금의 1 stroke 마찰시험을 코팅되지 않은 STD-61 금형강 시편과 DLC 코팅된 STD-61 금형강 시편에 대하여 행하고, 시험 중 미끄럼거리에 따라 변화한 마찰계수를 Fig. 3에 나타내었다. 코팅되지 않은 STD-61 금형강에 대해 시험된 경우, 마찰시험 초기(미끄럼거리 약 0~1.6mm)에 마찰계수가 급격히 증가하여 0.8에 이르고 이후 순간적으로 감소하여 0.4의 마찰계수를 나타내었다. 이후 미끄럼 거리가 증가함에 따라 마찰계수가 증가하고 감소하는 거동이 반복(stick-slip 현상) 되었다. 이와 달리 DLC 코팅된 금형강으로 시험된 경우에는 마찰계수가 약 0.25~0.27 의 값으로 비교적 낮고 일정하게 유지되는 모습을 보였다. Fig. 4는 상온에서 마찰 시험 후 코팅되지 않은 STD-61 금형강과 DLC 코팅의 표면을 실체현미경으로 관찰한 사진이다. 코팅되지 않은 STD-61 금형강 표면에 흰색으로 보이는 것은 EDS 분석 결과 AZ31 Mg 입자가 천이 되어 있는 것으로 확인되었다. 코팅되지 않은 STD-61 금형강과 달리 DLC 코팅의 표면에서는 마그네슘 합금의 천이가 관찰되지 않았다.

Fig. 5는 250°C에서 AZ31 마그네슘 합금과 코팅되지 않은 STD-61 금형강 시편과 DLC 코팅된 STD-61 금형강 시편 간의 1-stroke 마찰시험 중 측정된 마찰계수를 미끄럼거리에 대한 변화로 나타낸 선도이다. 코팅되지 않은 STD-61 금형강과 DLC 코팅모두 마찰계수가 매우 높게 측정되었고 강한 stick-slip 현상이 나타난 것을 알 수 있다.

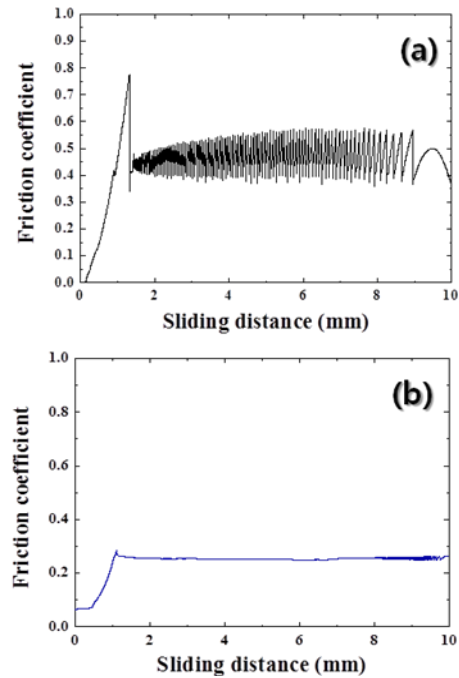


Fig. 3 Variation of friction coefficient as a function of sliding distances during sliding of the AZ31B Mg alloy against the STD-61 tool steel: (a) uncoated, (b) DLC coated

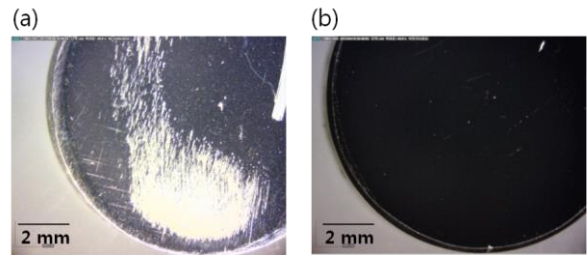
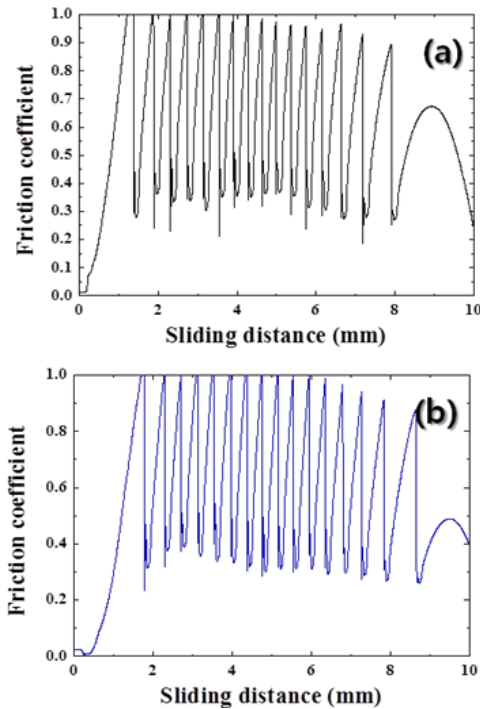


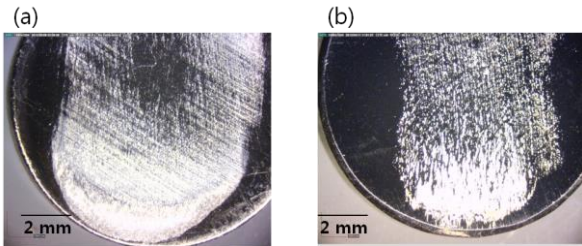
Fig. 4 Stereo optical micrographs of STD-61 tool steel disks slid against AZ31 Mg for 10mm at room temperature: (a) uncoated disk showing transferred Mg alloy, (b) DLC coated disk showing no transferred Mg alloy

또한 시험 후 디스크 표면을 실체현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 6에 나타내었는데, 코팅되지 않은 STD-61 금형강 뿐만 아니라 DLC 코팅 표면에도 마그네슘의 천이가 발생한 것이 확인되었다.

J. Heinrichs와 P. Carlsson 등은 DLC를 비롯한 코팅재의 표면 거칠기와 표면 결함 등이 galling 저항성에 매우 중요한 영향을 미친다고 보고하였다[8~10]. 이들의 연구는, 코팅 표면의 거칠기(roughness)가 높을수록 마찰력이 증가하며 galling 현상이 심화됨을

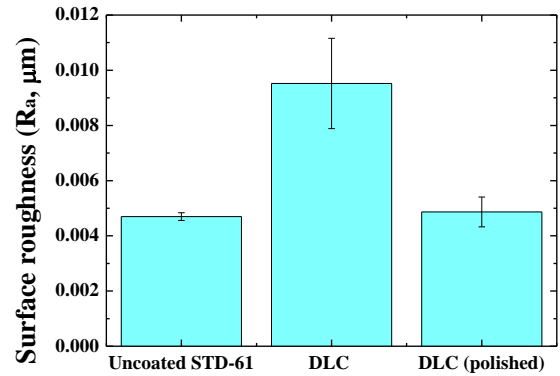


**Fig. 5** Variation of friction coefficient as a function of sliding distances (1-stroke test, 400N, 0.2mm/s, 250°C): (a) AZ31 Mg disk against uncoated STD-61 steel pin, (b) AZ31 Mg disk against DLC coated STD-61 steel pin



**Fig. 6** Stereo optical micrographs of STD-61 tool steel disks slid against AZ31 Mg for 10 mm at 250°C: (a) uncoated disk, (b) DLC coated disk

보였는데 이는 코팅 표면에 형성되어 있는 scratch 등의 결함부로부터 천이현상이 시작되어 galling이 발생하기 때문으로 설명하였다. 따라서 250°C에서 DLC 코팅이 galling 현상을 억제하지 못하고 마찰계수가 높았던 원인 규명의 일환으로, DLC 코팅의 표면조도의 영향을 살피고 마그네슘이 응착된 부분에서 DLC 코팅의 표면 결함 여부를 확인하였다. Fig. 7에 코팅되지 않은 STD-61 금형강 시편(표면 연마됨), 표면 연마되지 않은 DLC 코팅, 1µm diamond

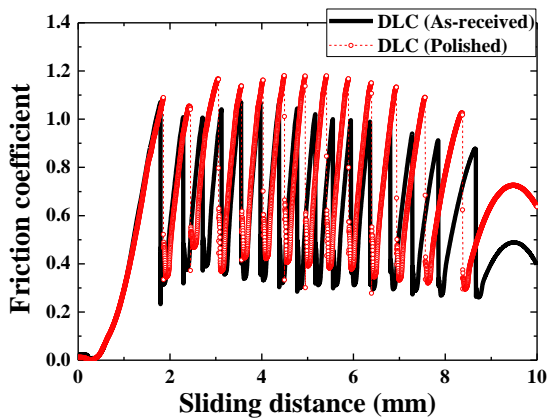


**Fig. 7** Average surface roughness (Ra) of the uncoated STD-61 tool steel, as-deposited and polished(1µm diamond suspension polishing) DLC coatings

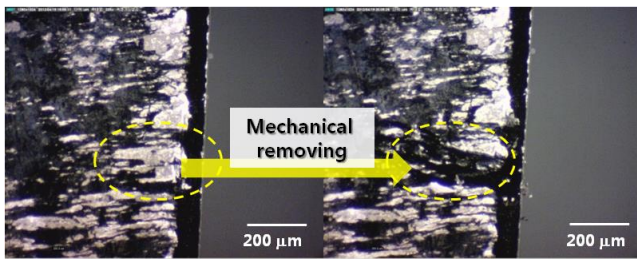
suspension으로 미소연마된 DLC 코팅의 평균 표면조도(Ra)를 비교하였다. 미소 연마되지 않은 as-deposited 상태 DLC코팅의 평균표면조도는 약 0.01 µm로 코팅되지 않은 금형강 표면의 표면조도인 0.005µm에 비해 약 2배 이상 높은 값을 보였다. 미소 연마된 DLC 코팅의 표면조도는 코팅되지 않은 금형강과 비슷한 값을 보였다. 그러나, 더 낮은 평균 표면조도를 지녔음에도 불구하고, 미소 연마된 DLC 코팅층은 연마되지 않은 DLC 코팅층보다 250°C에서 더 높은 마찰계수를 나타내었다(Fig. 8). 250°C 마찰 시험 중 galling이 발생한 시편 표면에 응착된 Mg 합금을 기계적으로 제거하고, 원래의 DLC 코팅층을 광학현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9의 DLC 코팅층에서는 박리 또는 표면 결함 등이 관찰되지 않는다. 이들 결과는 250°C에서 DLC 코팅에 발생한 Mg 합금 응착이 DLC 코팅의 표면 결함으로 인한 기계적인 작용에 의한 것이 아니고, 높은 온도에서 발생한 DLC 코팅의 구조 변화에 의한 것임을 시사한다.

A. Erdemir 등은 DLC 코팅이 저마찰 특성을 나타내는 현상을, 마찰이 반복됨에 따라 DLC 코팅의 미끄럼 상대마찰재 표면에 탄소 중의(carbonaceous) 윤활층(또는 천이층, transfer layer)이 형성되는 점[11]과 DLC 코팅 내에 함유된 수소에 의한 dangling bond passivation으로 설명하였다[12]. 미끄럼 상대재 표면에 형성된 DLC 천이층(transfer layer)은 불규칙하게 배열된 흑연상 구조를 갖고 DLC 코팅과 마찰상대재 사이의 상대적 움직임(slip, sliding, shear)을 원활하게 하여 마찰을 줄인다. 그리고 DLC 코팅에 함유된





**Fig. 8** Variation of friction coefficient of the as-deposited and polished DLC coating as a function of sliding distances(1-stroke test, 400 N, 0.2mm/s, 250 °C, against the AZ31 Mg alloy)



**Fig. 9** Optical micrograph of the galling-occurred DLC coating surface, which slid against the AZ31 Mg alloy at 250 °C

수소는, 코팅층 표면에 돌출한 탄소 원자의 dangling bond와 결합하여 DLC 코팅 표면의 dangling bond와 마찰 상대재 간에 작용하는 강한 응착력(adhesive force)을 크게 줄여 마찰계수를 낮추는 것으로 설명된다. 본 연구에 사용된 마찰 실험에서는 DLC 코팅과 상대재 간의 미끄럼 거리가 10mm로 매우 짧았고, 1 stroke 시험에 따라 동일한 표면에 반복적으로 마찰이 발생하지 않아, 위에서 언급된 탄소계 윤활 층이층은 실제로 형성되지 못한 것으로 유추된다. 이에 따라 Mg 합금과의 상온 미끄럼에서 확인된 DLC 코팅의 우수한 상온 galling 저항성은, 층이층보다는 수소에 의한 dangling bond의 passivation에 의한 것으로 해석된다. 250 °C에서 발생한 Mg 합금의 응착은 이 같은 passivation 효과가 사라지거나 약화된 때문으로 추정되고, 이에 대한 후속 연구가 진행 중이다.

#### 4. 결론

AZ31 마그네슘 합금과 DLC 코팅된 STD-61 공구강의 마찰특성을 상온과 250 °C에서 미끄럼 마찰 시험을 통해 분석하고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 상온에서 DLC 코팅층은 마그네슘 합금의 STD-61 공구강으로의 천이를 효과적으로 저지하여, 미끄럼 마찰 시 낮고 안정된 마찰계수가 측정되었다. 코팅되지 않은 금형의 경우 마그네슘의 천이가 발생하여 마찰계수가 높고 stick-slip 현상이 관찰되었다.

(2) 250 °C에서 DLC 코팅은 마그네슘 합금의 응착을 저지하지 못하였고, 코팅되지 않은 금형의 경우와 유사하게 마찰 시험 중 매우 높은 마찰계수와 심한 stick-slip 현상이 관찰되었다.

(3) 상온에서 관찰된 DLC 코팅의 우수한 마찰 특성은 DLC 코팅층 내 수소에 의한 dangling bond의 passivation에 의한 것으로 해석되었고 이에 대한 후속 연구가 진행 중이다.

#### 후 기

본 연구는 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2009-0093814)과 지식경제부의 WPM(World Premier Materials) 사업을 수행하는 수송기기용 초경량 Mg 소재 사업단의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### REFERENCES

[1] J. G. Park, Y. S. Kim, T. Kuwabara, B. S. You, 2005, Plastic Deformation Characteristic of AZ31 Magnesium Alloy Sheet, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 14, No. 6, pp. 520~526.

[2] B. Sersomroeng, V. Premanond, P. Kaewtatip, A. Khantachawana, N. Koga, S. Watanabe, 2010, Anti-adhesion Performance of Various Nitride and DLC Films against High Strength Steel in Metal Forming Operation, *Diamond Relat. Mater.*, Vol. 19, No. 7, pp. 833~836.

[3] G. Reisel, B. Wielage, S. Steinhauser, H. Hartwig, 2003, DLC for Tools Protection in Warm Massive Forming, *Diamond Relat. Mater.*, Vol. 12, No. 3, pp.

- 1024~1029.
- [4] A. A. Gharam, M. J. Lukitsch, M. P. Balogh, A. T. Alpas, 2010, High Temperature Tribological Behavior of Carbon Based ( $B_4C$  and DLC) Coatings in Sliding Contact with Aluminum, *Thin Solid Films*, Vol. 519, No. 5, pp. 1611~1617.
- [5] A. Wank, G. reisel, B. Wielage, 2006, Behavior of DLC Coatings in Lubricant Free Cold Massive Forming of Aluminum, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 201, No. 3, pp. 822~827.
- [6] M. Murakawa, N. Koga, T. Kumagai, 1995, Deep-Drawing of Aluminum Sheets without Lubricant by Use of Diamond-like Carbon Coated Dies, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 76-77, pp. 553~558.
- [7] M. D. Hanna, 2009, Tribological Evaluation of Aluminum and Magnesium Sheet Forming at High Temperatures, *Wear*, Vol. 267, No. 5, pp. 1046~1050.
- [8] J. Heinrichs, M. Olsson, S. Jacobson, 2012, New Understanding of the Initiation of Material Transfer and Transfer Layer Build-up in Metal Forming-In Situ Studies in the SEM, *Wear*, Vol. 292-293, pp. 61~73.
- [9] J. Heinrichs, M. Olsson, S. Jacobson, 2012, Mechanisms of Material Transfer Studied in Situ in the SEM: Explanations to the Success of DLC Coated Tools in Aluminium Forming, *Wear*, Vol. 292-293, pp. 49~60.
- [10] P. Carlsson, M. Olsson, 2006, PVD Coatings for Sheet Metal Forming Processes- A Tribological Evaluation, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 200, No. 14, pp. 4654~4663.
- [11] A. Erdemir, C. Bindal, G. R. Fenske, C. Zuiker, P. Wilbur, 1996, Characterization of Transfer Layers Forming on Surfaces Sliding against Diamon-like Carbon, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 86-87, pp. 692~697.
- [12] A. Erdemir, 2001, The Role of Hydrogen in Tribological Properties of Diamond-like Carbon Films, *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 146-147, pp. 292~297.