

# 다구찌법을 이용한 자동차용 카본 휠 성형공정에 관한 연구

류미라\*, 전환영\*\*,#, 박철현\*\*, 배희은\*\*\*, 배효준\*\*\*\*

\*부산과학기술대학교 자동차 계열, \*\*김해대학교 기계자동차공학과,

\*\*\*동아대학교 대학원 기계공학과, \*\*\*\*동의대학교 기계공학과

## A Study on the Molding Process of Carbon Fiber Automotive Wheels by Taguchi method

Mi-Ra Ryu\*, Hwan-Young Jeon\*\*,#, Chul-Hyun Park\*\*, Hui-Eun Bae\*\*\*, Hyo-Jun Bae\*\*\*\*

\*Division of Automobile and Busan Institute of Science and Technology,

\*\*Department of Mechanical and Automotive Design, Gimhae college,

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, DongA University,

\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University

(Received 24 May 2017; received in revised form 31 May 2017; accepted 8 June 2017)

### ABSTRACT

Weight reduction of the wheel is exerts a great influence on the running performance of the vehicle, a lot of research for a lightweight aluminum wheels progress. In order to select the molding conditions through the experiment on the carbon fiber prepreg molding process based on the design of the mold for manufacturing the carbon wheel using the carbon fiber pressure forming method, the carbon wheel molding process using the Taguchi method And to produce prototypes based on the results.

**Key Words** : Automotive Wheel(자동차 휠), Carbon Fiber Prepreg(카본 소재), Wedge-Shaped Slider(V형 슬라이더), Press Forming(프레스 성형), Taguchi method(다구찌 법)

### 1. 서 론

휠(wheel)은 타이어(tire)와 함께 차의 전 중량을 분담하지하고 구동 및 제동시의 토크(torque), 노면으로부터의 충격, 선회시의 원심력과 구심력, 차가 기울어졌을 때 발생하는 옆방향의 힘 등에 견디어

야 하며 가벼울수록 회전축의 자유로운 운동성을 떨어뜨리는 회전관성을 낮추어 조향특성이 좋아지게 된다<sup>[1]</sup>.

기존 장착된 휠을 커스텀(custom) 휠로 교체하는 가장 근본적인 이유는 자동차 성능을 개선시키기 위함이나 근래에는 겉모양을 꾸미기 위해 교체를 많이 하고 있다. 전체 휠 시장은 30여개 브랜드가 전체 시장의 대략 10%를 차지하고 있어, 시장은 경쟁이 치열하고 독보적인 업체가 없어 춘추

# Corresponding Author : jhy1970@gimhae.ac.kr

Tel: +82-55-320-1470, Fax: +82-55-3221-2556

전국시대라 볼 수 있다<sup>[2-4]</sup>.

고유가 및 친환경 시대에 저연비 자동차 및 전기 자동차 및 하이브리드(hybrid) 자동차에서 더욱 효율적인 차체 경량화를 위한 부품 개발 필수적이다.

알루미늄(aluminum) 합금 휠이나 카본(carbon) 휠은 스틸(steel) 휠보다 재료 자체의 탄성도가 3 배쯤 높다. 탄성이 높다는 말은 순간적으로 충격을 받았을 때 이를 소화해 내는 능력이 우수하다는 뜻이다. 이것은 늘 매끈하지만은 않은 노면을 달려야하는 자동차 입장에서 무척 중요한 요소이다. 휠의 충격 흡수량이 높을수록 서스펜션(suspension)과 차체에는 그만큼 부담이 줄어들어 결과적으로 주행안전성과 승차감을 향상시켜 주기 때문이다. 국내에서도 탄소 섬유 적층법에 대한 연구가 진행되고 있지만, 카본 휠에 적용한 연구는 거의 없으며, 관련 기술을 보유한 업체도 극소수이기 때문에 향후 시장개방 및 자동차 부품산업의 발전을 위해서는 관련 연구가 시급한 실정이다<sup>[5-9]</sup>.

본 연구에서는 탄소섬유 가압 성형법을 적용한 카본 휠을 제작하기 위한 금형을 설계를 바탕으로 탄소섬유 프리프레그(prepreg) 성형공정에 대한 실험을 통하여 성형 조건이 선정하기 위해서 실험계획법인 다구저법을 이용한 카본 휠 성형 공정에 관한 연구를 진행하고 그 결과를 바탕으로 시제품을 제작하고자 한다.

## 2. 인장시험

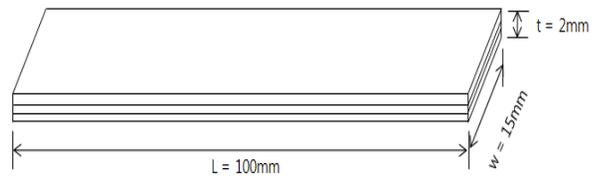
### 2.1 인장시험편제작

본 연구에서는 프리프레그를 배열 방향, 적층수 및 가압 온도를 변수로 하여 시험편을 제작하였다. 각각의 변에 대한 설정 값은 배열 방향: 0°~45°, 적층 수: 10~12ply, 가압 온도: 120°C~140°C로 하였으며, Table 1에 나타내었다.

시험편의 치수는 KS M 3713을 기준으로 하여 길이(100mm)×폭(15mm)×두께(2mm)로 Fig. 1과 같이 제작 하였으며, 성형 조건의 설정 값에 대한 허용차와 가압 및 경화 스케줄은 Table 2, Fig. 2에 나타내었다.

**Table 1 Molding condition**

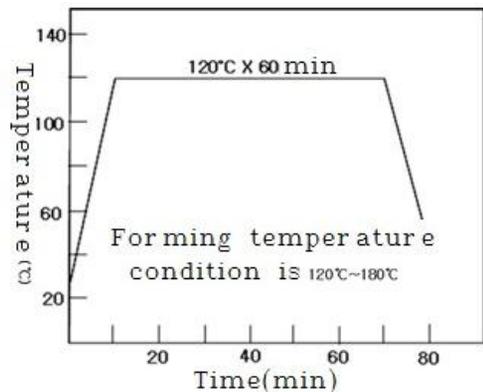
| Direct. (°) | integ. (ply) | Temp. (°C) |
|-------------|--------------|------------|
| 0           | 10           | 120        |
| 0           | 11           | 130        |
| 0           | 12           | 140        |
| 30          | 11           | 120        |
| 30          | 12           | 130        |
| 30          | 10           | 140        |
| 45          | 12           | 120        |
| 45          | 10           | 130        |
| 45          | 11           | 140        |



**Fig. 1 Tensile test specimens**

**Table 2 Allowable error**

| Moding condition | Error   |
|------------------|---------|
| Direction        | ± 1 °   |
| Temperature      | ± 3 ° C |
| Time             | +5%     |



**Fig. 2 Forming temperature condition**

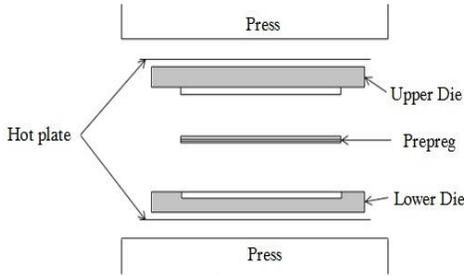


Fig. 3 The tensile test specimens produced conceptual

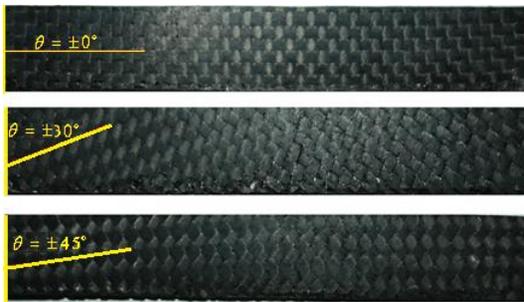


Fig. 4 The tensile test specimens array direction

인장 시험편을 제작하기 위하여 프레스(press)에 열판을 설치 후 상/하 열판 사이에 인장 시험편 금형을 설치한다. 시험편 규격에 맞는 크기로 잘라 낸 프리프레그를 적층 구성으로 기포가 들어가지 않도록 주의 하면서 적층하며, 적층된 프리프레그를 열판에 의해 가열된 금형에 넣고 가압하는 방법으로 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3과 같은 방법으로 제작된 시험편은 배열 방향 0°, 30°, 45°에 따라 Fig. 4와 같이 나왔으며, 배열 방향, 가압 온도 및 적층 수에 따라 다구찌법을 이용하여 실험 및 제작 하였다.

## 2.2 인장시험

본 연구에서는 인장시험은 10ton용량의 유압식 피로시험기 MTS-810을 사용하여 실시하였다. Fig. 4에서 제작한 시험편을 이용하여 다구찌법으로 실험하였으며, 각 인자와 수준에 대하여 Table 3에 나타내었다. 다구찌법을 이용하여 2번의 인장 시험한 결과 각 인자와 수준에 대한 최대 인장강도

값은 Table 4와 같이 나타났으며, S/N 비는 Fig. 5과 같이 나타났다.

다구찌법을 이용하여 시험한 결과 S/N비를 보았을 때 배열 방향이 0°일 때 최대 인장 강도가 가장 높았으며, 30°와 45°로 배열 방향이 커질수록 최대 인장 강도가 낮아졌다. 성형 온도는 130°C일 때 최대 인장 강도가 가장 높았으며, 적층 수는 12ply일 때가 최대 인장강도가 가장 높게 나타나며, 적층 수가 많을수록 높게 나타났다.

Table 4의 S/N 비를 이용한 각 인자 수준별 일원표 및 점 추정치를 Table 5, Table 6에 나타내었으며, 최대 인장응력 값을 이용하여 각 인자 수준별 일원표 및 점 추정치는 Table 7, Table 8에 나타내었다. Fig. 5와 같이 S/N 비 그래프를 보면 추정치에 대한 값은 배열방향에서 0수준인 0°, 성형 온도에서 1수준인 130°C와 적층 수에서 2수준인 12ply일 때 추정치가 가장 높게 나왔으며, 이 값을 이용하여 0°, 130°C와 12ply일 때의 S/N 비와 최대 인장 응력 값을 추정해 보면 식(1)에 의해 계산된 추정 값  $\widehat{\mu}_{S/N}(A_0, B_2, C_1)$ 는 58.8434db,  $\widehat{\mu}_{T/S}(A_0, B_2, C_1)$ 는 606.314MPa로 실험값과 비교하였을 때 최대값으로 나타났다. 여기서 S/N 비의 모 평균값  $\widehat{\mu}_{S/N}$ 은 43.9552db이고,  $\widehat{\mu}_{T/S}$ 는 245.8328MPa이다.

$$\widehat{\mu}(A_0, B_2, C_1) = \widehat{\mu} + \widehat{a}_0 + \widehat{\mu} + \widehat{b}_2 + \widehat{\mu} + \widehat{c}_1 - 2\widehat{\mu} \quad (1)$$

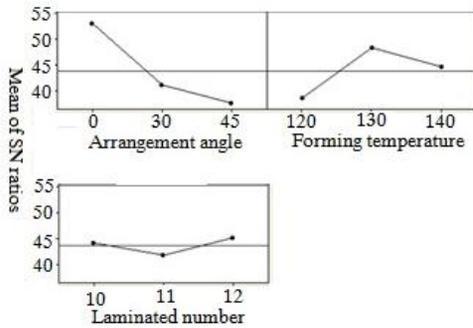
다구찌법에 의해 나온 추정 값과 비교하기 위해 배열방향 0°, 성형 온도 130°C와 적층 수 12ply인 인장 시험편을 제작하여 인장 시험을 실시하였으며, 최대 인장 강도가 918.62MPa로 가장 높게 나타났다는 것을 알 수 있었고, 인장 시험 결과에 대하여 Fig. 6에 나타내었다.

Table 3 Factor & Level

| Factor \ Level | A Direct. (°) | B Integ. (ply) | C Temp. (°C) |
|----------------|---------------|----------------|--------------|
| 0              | 0             | 10             | 120          |
| 1              | 30            | 11             | 130          |
| 2              | 45            | 12             | 140          |

**Table 4 Result**

| °  | ply | °C  | Tensile st. (MPa) |        | S/N ratio |
|----|-----|-----|-------------------|--------|-----------|
|    |     |     | 1th               | 2th    |           |
| 0  | 10  | 120 | 406.84            | 569.52 | 53.4081   |
| 0  | 11  | 130 | 496.99            | 604.97 | 54.6974   |
| 0  | 12  | 140 | 412.84            | 590.80 | 53.5990   |
| 30 | 11  | 120 | 35.94             | 56.25  | 32.6351   |
| 30 | 12  | 130 | 331.91            | 221.52 | 48.3186   |
| 30 | 10  | 140 | 108.93            | 109.85 | 40.7793   |
| 45 | 12  | 120 | 40.71             | 72.06  | 34.0013   |
| 45 | 10  | 130 | 95.76             | 78.82  | 38.6964   |
| 45 | 11  | 140 | 105.93            | 85.35  | 39.4617   |



**Fig. 5 S/N ratio**

**Table 5 S / N ratio of each factor**

| Factor Level | A Direct. (°) | B Integ. (ply) | C Temp. (°C) |
|--------------|---------------|----------------|--------------|
| 0            | 162.1726      | 132.8838       | 120.0445     |
| 1            | 121.7330      | 127.2623       | 142.1700     |
| 2            | 112.1594      | 135.9189       | 133.8400     |
| SUM          | 396.0650      | 396.0650       | 396.0545     |

**Table 6 Estimates of S/N ratio**

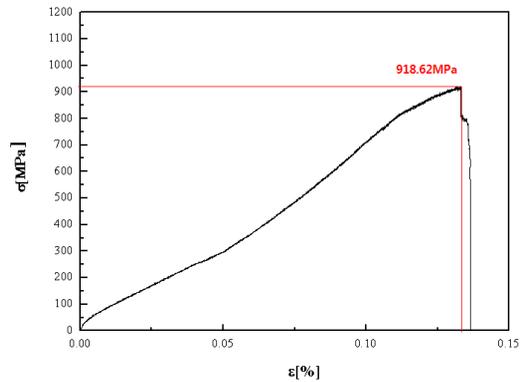
| Factor         | Level | Estimates |
|----------------|-------|-----------|
| A Direct. (°)  | 0     | 54.0575   |
|                | 1     | 40.5777   |
|                | 2     | 37.3805   |
| B Integ. (ply) | 0     | 44.2946   |
|                | 1     | 42.4208   |
|                | 2     | 45.3063   |
| C Temp. (°C)   | 0     | 40.0148   |
|                | 1     | 47.3900   |
|                | 2     | 44.6133   |

**Table 7 Each factor level table**

| Factor Level | A Direct. (°) | B Integ. (ply) | C Temp. (°C) |
|--------------|---------------|----------------|--------------|
| 0            | 1540.98       | 590.67         | 684.87       |
| 1            | 432.21        | 915.00         | 692.73       |
| 2            | 239.31        | 706.86         | 690.93       |
| SUM          | 2,212.50      | 2,212.530      | 2,068.53     |

**Table 8 Estimates of each factor**

| Factor         | Level | Estimates |
|----------------|-------|-----------|
| A Direct. (°)  | 0     | 513.66    |
|                | 1     | 144.07    |
|                | 2     | 79.77     |
| B Integ. (ply) | 0     | 228.29    |
|                | 1     | 230.91    |
|                | 2     | 278.31    |
| C Temp. (°C)   | 0     | 196.89    |
|                | 1     | 305.00    |
|                | 2     | 235.62    |



**Fig. 6 Tensile test result (Direct.0°; integ.12ply; Temp.130°C)**

### 3. 시제품 제작

#### 3.1 탄소 섬유 프리프레그 제단

본 연구에서 사용하는 탄소섬유는 가위나 칼로 제단할 경우 날이 무뎌져 작업성이 떨어진다. 그래서 윤곽라인에 따라 철형을 만들어 제작하려고

했으나 에폭시 수지와 탄소섬유 및 수지를 보호하기 위해 붙어있는 비닐과 종이 등을 동시에 절단할 수 없었다.

이러한 과정에서 프리프레그를 여러 겹 합쳐 워터젯(water jet)으로 절단하였으나 절삭성을 높이기 위해 투입되는 미세 가루가 프리프레그 전달부에 남아 제품의 품질에 영향을 미치게 되었다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같은 전용 제단기로 Fig. 8의 휠의 윤곽라인을 이용하여, Fig. 9와 같이 워터젯으로 프리프레그를 절단하였다.



Fig. 7 Carbon fiber prepreg cutter



Fig. 8 Contour line of wheel



Fig. 9 A water jet cutting a prepreg

### 3.2 금형 장착

본 연구에서는 휠 시제품을 성형하기 위하여 유압프레스에 금형을 장착하였다. 또한 탄소섬유 프리프레그를 적층하기 위한 작업공간이 충분히 확보하고, 각 부분에 전기를 공급하기 위해 단자대가 금형에 설치되고 봉형 히터가 각 부위에 삽입하였다. 또한 금형 내에 온도센서를 설치하여 한계온도 이상 가열되는 것을 방지하도록 하였다.

Fig. 10은 금형 장착 후 슬라이드 부의 이동을 확인하는 과정이다. 확인을 하는 이유는 슬라이드의 작동이 원활해야 상부 금형의 쉐기에 의해 휠의 측면을 슬라이드가 가압하여 휠 외형을 만들 수 있기 때문이다.

탄소섬유 프리프레그는 탄소섬유를 직조한 천에 에폭시 수지를 얇게 도포하고 앞뒷면에 보호용 비닐이 덮여진 얇은 종이와 같아서 한 장씩 분리해서 사용했고 Fig. 11과 같이 금형을 설치하였다.



Fig. 10 Move check of slide



(a) Upper die

(b) Lower die



(c) Closed die

Fig. 11 Complete mold

### 3.3 프리프레그 적층

본 연구에서는 탄소섬유 프리프레그의 경우 재료비가 고가이므로 먼저 유리섬유 프리프레그를 이용하여 휠을 제작하고 적층방법을 검토하였다.

스포크(spoke)와 림(rim)부의 원활한 접합 구조를 만들기 위해 림부를 감은 프리프레그는 스포크 부 아래 쪽으로 들어가고 스포크 부를 적층하고 다시 림부를 적층하는 과정을 반복하여 최대한 많은 면적이 겹치도록 측정하였다. 적층 후 가압 가열한 후 상형을 제거한 결과는 Fig. 12와 같고, 소재의 투입량에 따라 플래시(flash)가 발생하고 내부에 미충진된 곳을 점검하여 이후 적층시 반영하도록 하였다.



Fig. 12 After stripping products

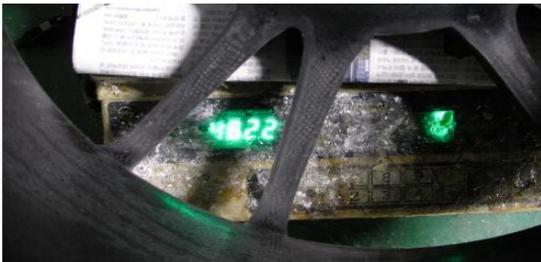


Fig. 13 Prototype (Wight : 4.622kg)



Fig. 14 Vehicles equipped with wheels

탄소섬유 프리프레그 적층하기 위해서는 금형의 온도가 조금 올라가야 에폭시(epoxy) 수지가 약간 녹아 금형 표면에서 떨어지지 않는다. 림부 하부의 강도를 보강하기 위해 먼저 프리프레그를 적층 후 림부와 스포크 부를 적층하였다.

이와 같이 적층 후 가압과 가열을 동시에 진행하여 제품을 제작하였고 금형에서 성형된 제품은 플래시가 많으므로 탈형 후 제거 작업을 수행하였다.

휠의 림부는 타이어가 장착되는 부분이므로 플래시 제거 후에 표면을 정삭하여 치수를 맞추도록 하였다. 시제품의 경우 Fig. 13과 같이 4.622kg으로 측정되었고, Fig. 14는 타이어에 장착한 모습을 나타내고 있다.

## 4. 성능 평가 실험

### 4.1 소음측정

본 연구에서는 실내 소음을 측정하기 위해 알루미늄 휠 순정 17인치와 18인치, 카본 휠 18인치를 비교하여 실내 소음을 측정하기 위하여 자동차를 고정하고 앞바퀴를 탄소섬유 휠로 장착하였다. 장착 후 시속 80km 까지 서서히 속력을 올려 휠의 파손여부를 확인 후 실차 내부에 소음 측정 장치를 설치하고 40km/h 및 60km/h에서 소음을 측정하도록 하였다. Fig. 15는 소음측정의 위한 장치를 나타내었고, Table 9는 소음측정의 결과를 나타내었고 Fig. 16과 같이 비교하였다.

그 결과 17인치 알루미늄 휠에 비해 18인치 알루미늄 휠 장착 시 차량 실내소음이 순정 조금 높은 결과를 나타내고 카본을 장착한 경우에는 낮게 측정이 되는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 자동차가 주행시 타이어가 앞으로 나가는 모습을 보면 타이어와 노면이 닿는 부분은 동그란 모습이 아닌 평평한 모습으로 변형이 일어난다. 이때 이 타이어에 변형이 일어날 때 고무의 경도에 의한 저항이 오는데 이를 구름 저항이라 하며 이 구름저항은 차량 총중량에 비례해서 작용한다. 따라서 무게가 무겁고 인치가 큰 경우 타이어가 단면 폭이 넓어 타이어와 노면이 접촉하는 면적이 크고 소음이 조금 증가 된 것으로 판단된다. 하지만 카본

휠의 경우 인치는 커지만 무게가 기존 17인치와 18인치 알루미늄 휠에 비해 무게가 50%정도 가볍다. 따라서 구름저항이 기존의 알루미늄 휠 보다 작으므로 소음이 작은 것을 알 수 있었다.



Fig. 15 Noise measurement device

Table 9 Noise measurement result

|                    | Aluminum wheel  |      |        |      | 18inch Carbon wheel |      |
|--------------------|-----------------|------|--------|------|---------------------|------|
|                    | 17inch (Retail) |      | 18inch |      |                     |      |
| Velocity (km/h)    | 40              | 60   | 40     | 60   | 40                  | 60   |
| Driver's seat [dB] | 52.7            | 55.0 | 53.0   | 55.6 | 52.2                | 54.5 |
| Passenger [dB]     | 52.7            | 56.9 | 53.6   | 56.9 | 51.9                | 55.9 |

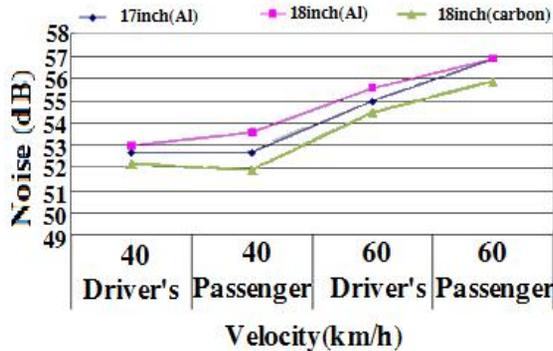


Fig. 16 Noise measurement comparisons

## 5. 결론

본 연구에서는 탄소섬유 가압 성형법을 적용한 카본 휠을 제작하기 위한 금형을 설계로 바탕으로 탄소섬유 프리프레그 성형공정에 대한 실험을 통하여 성형 조건이 선정하기 위해서 실험계획법인

다구찌법을 이용한 카본 휠 성형 공정에 관한 연구를 진행하고 그 결과를 바탕으로 시제품을 제작하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다구찌법에 의한 추정치에 대한 값은 배열방향에서 0수준인 0°, 성형 온도에서 1수준인 130°C와 적층 수에서 2수준인 12ply일 때 추정치가 가장 높게 나왔다.
2. 프리프레그를 배열 방향, 적층 수 및 가압 온도를 변수로 하여 실험 계획법인 다구찌법을 사용하여 인장시험을 한 결과 배열방향 0°, 성형 온도 130°C와 적층 수 12ply이 최대 인장 강도가 918.62MPa로 가장 높게 나타났다는 것을 알 수 있었다.
3. 다구찌법의 결과를 바탕으로 탄소섬유 프리프레그를 제단하고 적층하여 금형에 장착하였다.
4. 실내 소음을 측정하기 위해 알루미늄 휠 순정 17인치와 18인치, 카본 휠 18인치를 비교하여 측정한 결과 17인치 알루미늄 휠에 비해 18인치 알루미늄 휠 장착 시 차량 실내소음이 순정 조금 높은 결과를 나타내고 카본을 장착한 경우에는 낮게 측정이 되는 것을 알 수 있었다.

## REFERENCES

1. Choe, J. C., Park, I. M., Yoon, E. P., Nam, T. W., "Disk Wheels of Light Metals for Automobiles", Journal of Korea Foundry Society, Vol. 7, No. 3, pp. 179-183, 1987.
2. Hong, D. P., Kim, H. S., Y. Hong, Ko, Y. G., Yoo, C. H., "The Vibration Characteristics of Hybrid Shaft by the Layering Method on the Outer Surface of the Carbon Fiber Prepreg", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers Spring Conference Proceedings, pp. 59-64, 2009.
3. Kim, M. S., Ko, K. J., Kim, J. H., Yang, C. G., Kim, K. M., "The Study on the Fatigue Life Prediction on Wheels through CAE", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 2, pp. 117-122, 2004.
4. Kim, S., Kang, H., Yang, S., "Fatigue Life

- Prediction of Automotive Wheels subjected to Bending Moments Using Flexible body", The Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference Proceedings, pp. 1623-1628, 2005.
5. Lee, D. J., Ko, H. G., Ko, J. M., "The Study on the Development and Verification of Structure Analysis Method Considering Thinning Effect after Press Forming in Steel Wheel Design", The Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference Proceedings, pp. 710-715, 2003.
  6. Chung, T. E., Yin, J. J., Lee, D. J., Ko, H. G., Ko, J. M., "Forming Analysis on the 4-spoke Typed Skeleton Steel Wheel Disk", The Korean Society of Automotive Engineers Spring Conference Proceedings, pp. 1329-1334, 2004.
  7. Han, S. R., "Improvement of Insert Molding for Refrigerator Glass Shelves Using Numerical Analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 6, pp. 50-57, 2016.
  8. Lee, I. K., Lee, S. Y., Lee, S. K., Ahn, M. S., "Trimless Blank Design for Hot Stamping Process of a Sill Side", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 93-99, 2016.
  9. Park, D. H., Kwon, H. H., "Development of Automotive Seat Rail Parts for Improving Shape Fixability of Ultra High Strength Steel of 980MPa", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 5, pp. 137-144, 2016.