

마찰교반용접법을 이용한 2피스 알루미늄 휠의 개발

최인영^a, 강영준^{b*}, 김안드레이^a, 안규생^c

Development of the Two-piece Aluminum Wheels Using the Friction Stir Welding

In-Young Choi^a, Young-June Kang^{b*}, Andrey Kim^a, Kyu-Saeng Ahn^c

^a Department of Mechanical Design, Graduate School of Chonbuk Univ. Republic of Korea

^b Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk Univ. Republic of Korea

^c AMP Tech Co. Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

| | | | |
|----------|----|-------|------|
| Received | 6 | March | 2013 |
| Revised | 27 | May | 2013 |
| Accepted | 7 | June | 2013 |

Keywords:

Aluminum wheel
Rim
Friction stir welding
FEM

ABSTRACT

Owing to high oil prices and environmental issues, the automobile industry has conducted considerable research and made large investments to manufacture a high-efficiency automobiles. In the case of automobile wheels in which a lightweight material is used to increase the fuel efficiency a mold is used to increase the production efficiency; however, the use of the molding method for this purpose is very expensive. Therefore an automobile wheel consists of two parts. In this study a two-piece automobile wheel is manufactured by the friction stir welding(FSW) of Al6061-T6 to reduce the manufacturing cost and process complexity. The FSW welding tool geometry and rotational speed, and the feed rate are key factors that significantly affect the weld strength. Therefore tensile tests were conducted on specimens produced using various welding conditions, and the optimal FSW welding conditions were applied to manufacture aluminum wheels. To ensure reliability, prototype aluminum wheels were manufactured and their mechanical reliability and safety were evaluated using a durability test, fatigue durability test, and impact test. Through this study, aluminum wheel production was made possible using the FSW method.

1. 서론

최근 전 세계적으로 환경오염 및 지구 온난화에 따른 기상 이변에 대한 위기의식이 점차 증폭되고 있으며, 이에 따라 선진국을 중심으로 환경규제를 강화하여 환경오염을 억제하려는 노력을 기울이고 있다. 이에 따른 일환으로 세계 유수의 자동차 생산업체에서는 강화된 환경기준에 대처하고 에너지의 효율적인 사용을 위한 방안으로 성능과 연비가 우수한 친환경 자동차의 개발에 많은 연구

와 투자를 병행하고 있다.

자동차의 휠 분야 또한 자동차의 성능과 연비향상을 위하여 경량 소재를 이용한 휠 개발에 많은 연구를 진행하고 있다. 일반적으로 자동차 휠은 주조와 단조방식을 통하여 만들어지며, 자동차의 안전과 더불어 소비자의 구매 욕구를 향상시키기 위하여 다양한 형태의 디자인이 요구 된다. 이러한 소비자들의 다양한 욕구 만족과 생산비용의 절감을 위하여 하나의 주조틀을 사용한 1피스(1Piece) 휠 보다는 각 부분을 분리하여 다양한 디자인을 적용할 수 있고 부분 수리가

* Corresponding author. Tel.: +82-63-270-2453

Fax: +82-63-270-2460

E-mail address: yjkang@jbnu.ac.kr (Young-June Kang).

가능한 2피스(2Piece), 3피스(3Piece) 휠의 생산이 많아지고 있다.

본 논문은 자동차 휠 생산에 있어 마찰 교반용접을 이용하여 초경량 2피스 알루미늄 휠을 제작하는 새로운 방법에 대한 논문이다. 초경량 2피스 알루미늄 휠 제작에 있어 생산 공정의 단순화와 원가 절감을 목적으로 마찰교반용접(Friction Stir Welding, FSW)을 적용하여 하였다. 또한 휠 제작에 있어 마찰 교반용접의 최적의 조건을 찾기 위하여 알루미늄 Al6061-T6 재질에 가장 효율적인 마찰교반용접 조건을 인장시험을 통하여 결정하였다. 이를 휠에 적용하여 초경량 2피스 알루미늄 휠의 시제품을 제작하여 주행내구성 시험, 피로내구성 시험, 충격 시험, 침투탐상 시험, 비파괴 검사(X-Ray)를 통하여 휠의 안정성을 확보하였다.

2. 2Piece 알루미늄 휠

2.1 2Piece 휠의 개요

자동차 휠(Wheel)은 자동차의 주행 안전성을 담보하는 가장 중요한 부품이다. 휠은 타이어를 장착·유지하고, 차량의 운동 에너지를 타이어에 전달·운전케 하는 보조적인 역할을 수행한다. 이러한 휠은 크게 타이어를 장착하는 림과 차량의 허브에 밀착하는 디스크로 구성되어 있다.

승용차에서는 고속으로 주행 시 밸런스(Balance)가 좋아야 하는 특성이 갖고 있어 1피스 휠을 중점적으로 생산 개발하고 있다. 최근 들어 전 세계 각국의 자동차 시장에서 기능적 특성과 내구성 및 안전성뿐만 아니라 소비자 구매 욕구를 향상하기 위하여 2피스, 3피스 휠의 수요가 급증하는 추세에 있다.

2피스 휠은 타이어를 장착하는 림(Rim)과 자동차 허브와 휠을 연결하는 디스크(Disk)로 분리하여 생산된 휠을 말한다. 림과 디스크는 주조와 단조 기법을 통하여 개발되며, 소비자의 다양한 욕구를 반영하기 위하여 많은 림과 디스크의 주조 틀이 사용되며, 이는 생산 원가의 상승 원인으로 작용한다. 따라서 이러한 주조제작 방식이 아닌 마찰 교반용접을 림 생산 공정에 도입할 경우, 일반적인 주조와 단조 제조 공법에서 발생 하였던 원재료 손실의 대폭 개선된다. 또한 단조 공법에서 복잡한 제조 공정을 단순화하여 생산원가를 대폭 절감 할 수 있으며, 주조 및 단조방식의 제품대비소재의 조직이 치밀하며 소재의 강성을 확보하여 경량화를 통한 연비향상 효과를 확보할 수 있다.

3. 마찰교반용접(FSW)원리 및 실험결과

3.1 마찰교반용접(FSW) 원리

마찰교반용접(FSW)은 모재를 회전시켜 마찰열을 이용하는 기존의 마찰용접(Friction Welding)과는 달리, 용접할 두 재료 사이

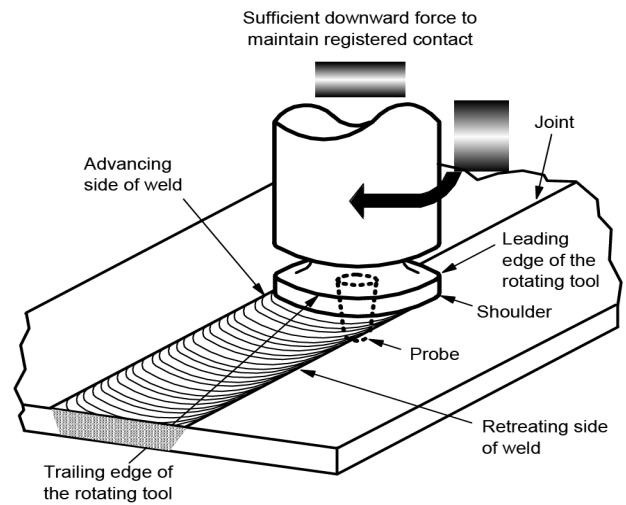


Fig. 1 Principle of friction stir welding (FSW)

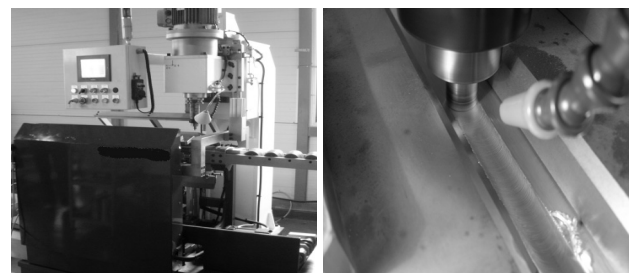
에 고속으로 회전하는 마찰교반용접 툴을 삽입하여 용접할 면을 따라서 진행한다. 이때 모재와 마찰교반용접 툴 사이에 강한 회전으로 인한 마찰열이 발생하게 되고 이 열로 인하여 모재의 소성유동을 유발하게 되어 두 재료의 용접이 가능하다^[1-5].

일반적으로 마찰 교반용접은 아크(Arc), 미그(MIG) 용접에 비하여 모재 대비 75% 이상의 강도를 나타낼 수 있는 효과적인 용접 방법이며 특히 알루미늄과 마그네슘과 같은 비철 금속의 용접에 탁월한 효과를 나타낸다. 또한 마찰교반용접 툴의 모양 및 툴의 회전 속도(RPM)와 이송속도(Feed rate)에 의하여 용접 강도가 결정되는 특징을 갖고 있다. Fig. 1은 일반적인 마찰 교반용접의 용접 원리를 나타낸 그림이다^[6-9].

3.2 교반용접기 및 인장시험

본 연구에 사용된 마찰교반용접기는 Fig. 2와 같은 국내 W사의 3축 스텐드 타입의 터치 패널 조작방식의 직선 마찰교반용접기를 사용하였다. Fig. 3은 마찰교반용접에 사용되는 용접 툴을 나타낸다.

마찰교반용접의 경우, 용접 성능의 마찰 교반용접 툴의 형상과 용접기의 회전수와 이송속도에 의하여 좌우된다. 따라서 이러한 변



(a) FSW machine (b) FSW process

Fig. 2 Photography of FSW process used in this work

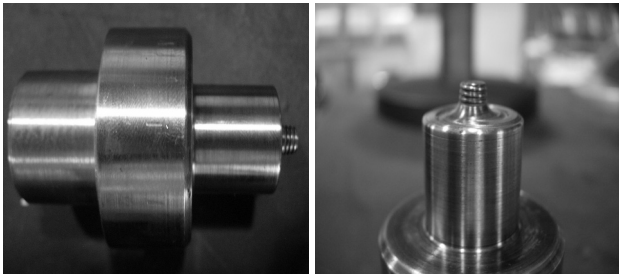


Fig. 3 Rotation tool used in this work

Table 1 FSW conditions for Al6061-T6

| change in conditions | | Spec. ID |
|----------------------|--------------------|----------|
| RPM | Feed Rate (mm/min) | |
| 1,000 | 300 | A-1 |
| | 270 | A-2 |
| | 330 | A-3 |
| 900 | 300 | B-1 |
| | 270 | B-2 |
| | 330 | B-3 |
| 1,100 | 300 | C-1 |
| | 270 | C-2 |
| | 330 | C-3 |



Fig. 4 Tensile specimen produced by FSW



Fig. 5 Tensile machine used in this work

수를 최적화하여 휠의 생산 공정에 도입하기 위하여 인장시험을 수행 하였다. Table 1은 2피스 알루미늄 휠의 최적 의 용접 조건을 결정하기 위하여 사용된 용접 톨의 회전수와 이송속도를 나타낸 표이다. Fig. 4는 마찰교반 용접의 최적 용접 변수를 도출하기 위하여 사용된 인장시편을 나타낸 그림으로서 KS B0801 제5호 규격에 따라 시험편을 가공하였다. Fig. 5는 인장 시험에 사용된 INSTRON 3382의 만능 시험기를 나타내며, 실험은 실온에서 분당 5 mm/min 속도로 인장시험을 수행하였다.

3.3 마찰교반 용접 시편의 인장실험 결과

본 실험은 마찰교반용접의 용접 변수 중 용접기의 회전수와 이송 속도의 변수를 최적화하여 휠 생산 공정에 도입하고자 수행되었다. 각각의 변수 별로 6개의 인장 시편을 제작하여 인장실험을 수행하였다. Fig. 6은 각각의 변수에 의하여 제작된 인장 시편의 하중 변위 선도를 나타내는 그림이며, Table 2는 각각의 용접 변수에 의하여 나타난 인장강도와 연신율을 평균하여 나타낸 표이다. Fig. 6과 Table 2에서 보듯 A-2, 즉 1,000 RPM의 회전속도와 270 mm/min의 이송속도에서 213.14 MPa로 가장 크고 C-2가 196.56 MPa으로 가장 적은 값의 결과를 볼 수 있었다. 따라서 인장강도의 값이 가장 큰 A-2의 용접 조건을 이용하여 초경량 2피스 알루미늄 휠의 제작하였다.

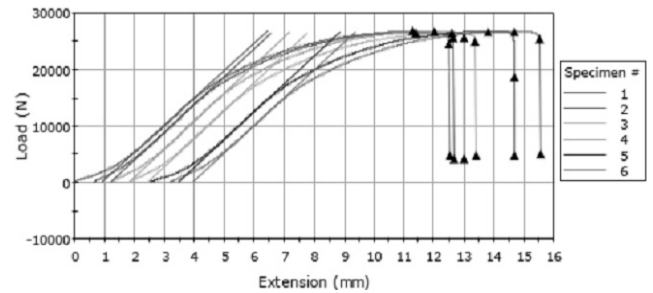


Fig. 6 Load and extension diagrams (ID A-2)

Table 2 Results of tensile test

| Spec. ID | Tensile Stress (N/mm ²) | Tensile Strain (%) |
|----------|-------------------------------------|--------------------|
| A-1 | 212.18 | 20.09 |
| A-2 | 213.14 | 20.11 |
| A-3 | 208.54 | 23.20 |
| B-1 | 203.28 | 23.93 |
| B-2 | 203.58 | 22.93 |
| B-3 | 208.03 | 22.49 |
| C-1 | 201.86 | 24.17 |
| C-2 | 196.56 | 23.70 |
| C-3 | 207.05 | 22.86 |

4. 휠 생산 공정의 단순화

4.1 마찰교반용접을 이용한 휠 생산 공정의 개발

주조방식으로 생산되는 알루미늄 휠의 경우, 매우 복잡한 생산 공정을 갖고 있다. 따라서 이러한 복잡한 공정을 단순화하여 생산 원가 절감의 효과를 극대화하기 위하여 마찰 교반 용접을 도입하였다. Fig. 7은 마찰 교반용접을 적용한 휠 생산 공정을 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯 압연판재를 원통롤링 공정을 거쳐 다양한 크기의 휠 림을 제작할 수 있으며, 기존의 생산 공정에 비하여 매우 단순한 형태로 진행된다. 따라서 원재료의 절감 효과 및 생산 공정의 단순화로 인하여 생산원가의 절감 효과가 극대화 된다.

4.2 압연판재의 원통 롤링 공정 개발

일반적으로 자동차의 휠의 경우, 적용되는 자동차의 종류와 소비자의 욕구에 의하여 다양한 크기의 휠이 사용된다. 따라서 휠의 형태를 만드는 압연 판재의 원통 롤링 공정이 매우 중요하게 된다.

Fig. 8은 마찰 교반용접을 수행하기 위하여 압연 판재를 휠의 모양으로 벤딩 작업하는 원통 롤링 공정을 나타낸 그림이다. 휠의 경우 소비자의 요구와 적용 자동차의 크기 및 하중에 의하여 다양한 크기의 휠의 생산이 필요하다.

따라서 압력 판재의 원형 롤링에 있어 3축의 회전 롤러를 이용하

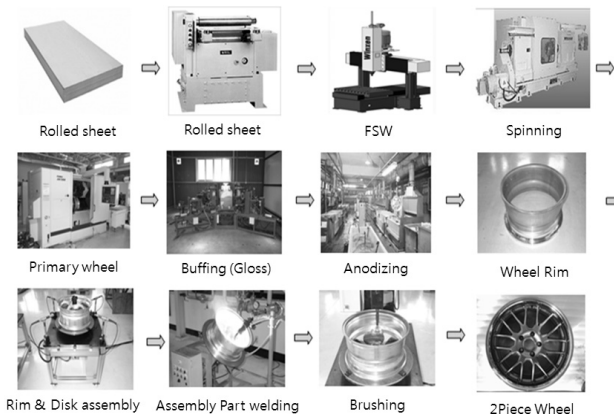


Fig. 7 Wheel production process using the FSW

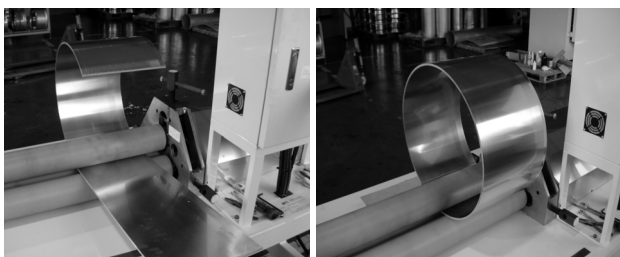


Fig. 8 Cylindrical bending machines

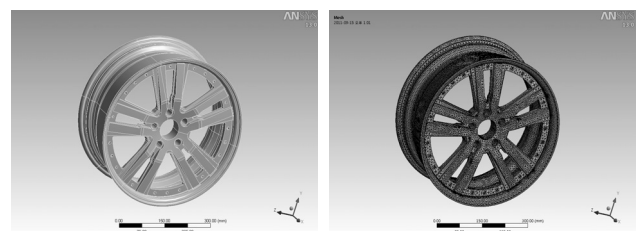
여 다양한 크기의 휠을 생산할 수 있도록 원통 롤링 벤딩기를 제작하였다. 원통롤링 공정과 마찰교반 용접 공정을 휠을 생산 공정에 도입하여 일반적인 휠 생산 공정에 비하여 생산 공정 단순화와 생산 원가절감 효과를 획득할 수 있었다.

5. 알루미늄 휠의 강도 해석

5.1 2피스 휠의 강도 해석

휠의 제작에 있어 알루미늄과 같은 경량소재를 이용할 경우, 자동차의 경량화 효과는 뛰어나지만 강도가 하락하는 단점이 발생한다. 또한 마찰 교반용접의 경우 기존 용접 방식에 비하여 강도가 우수한 특징을 갖고 있으나 용접 부분이 모재에 비하여 강도가 떨어지는 현상이 발생한다. 따라서 휠의 강도 해석을 통하여 알루미늄 휠의 안정성을 확보할 수 있는 모델의 개발과 생산 공정 단축을 위하여 강도해석을 진행하였다.

CATIA V5에서 알루미늄 휠의 모델링을 Fig. 9(a)와 같이 설계하였고, 휠의 강도 해석을 수행하였다. 휠의 강도 해석에 사용된 요소크기(Element Size)는 5 mm로 설정하고 Fig. 10(b)와 같이 사면체 요소 메쉬(Tetra Mesh) 생성 알고리즘을 사용하여 요소망을 생성하였다. 요소망 생성 결과, 절점(Nodes)은 309,159개이고, 요소(Elements)는 169,152개로 설정하였다. Table 3은 강도 해석에 사용된 알루미늄 6061-T6의 재료 물성 정보를 나타내며, 알루미늄 휠의 강도해석은 일반적으로 휠의 강도해석에 많이 사용되는 구조강도 해석, 굽힘 피로(Bending moment fatigue), 원주 피로(Radial fatigue), 충격(Impact Test) 등의 3가지 테스트를 진행하였다.



(a) Designed wheel

(b) Tetra Mesh

Fig. 9 Wheel designed by catia V5 and tetra mesh

Table 3 Material properties (Aluminum 6061-T6)

| Property | Value | Unit |
|-----------------|-----------|---------------------|
| Density | 2.849E-06 | kg/mm ³ |
| Young's Modulus | 703.074 | Kgf/cm ² |
| Poisson's Ratio | 0.33 | - |
| Yield Stress | 2814.42 | Kgf/cm ² |
| Tensile Stress | 3161.12 | Kgf/cm ² |

5.2 2피스 휠의 강도 해석 결과

알루미늄 휠의 사양의 기준으로 하중조건을 선정 하여 구조강도 해석은 굽힘 피로, 원주 피로, 충격 시험 등의 3가지를 수행하였다.

굽힘 피로 시험의 해석 조건은 휠의 회전이 가능하도록 원주 지지 구속조건에서 원주와 축 방향은 고정시키고 접선 방향만 구속을 풀어줬다. 또한 타이어를 장착했을 때 발생하는 압력을 0.24 MPa로 알루미늄 휠 외관 면에 수직방향으로 설정하였으며 알루미늄 휠의 회전 속도는 회전 속도 조건을 500 RPM으로 설정하였다. 해석에 적용시킨 굽힘 모멘트 값을 365.7 Kgf·m으로 설정하였다.

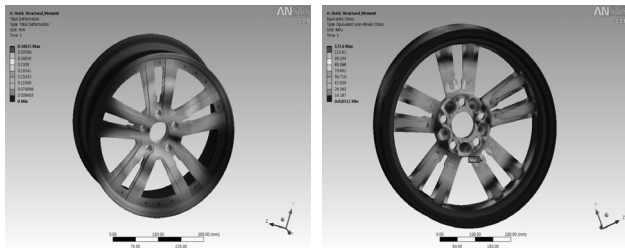
원주 피로 시험의 해석 조건은 굽힘 피로 테스트와 달리 알루미늄

휠의 회전 속도를 휠 회전 속도 조건에서 550 RPM으로 설정하였으며 임의의 벽면을 모델링하여 알루미늄 휠을 벽면 쪽으로 힘을 인가하였다. 이 때 적용된 힘은 베어링 하중 조건으로 1902 Kgf 설정하였다.

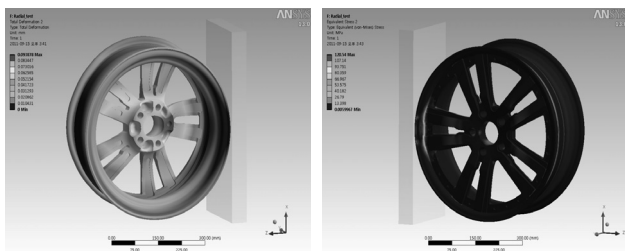
충격 시험 해석 조건에 경우에서는 알루미늄 휠을 13° 기울인 후, 600 Kg의 추를 230 mm 높이에서 떨어뜨렸다. 230 mm의 높이에서 자유낙하 시킨 추의 속도는 2.123 m/s로 설정하였으며 이 속도를 600 Kg의 추에 적용시켜 충격 해석을 수행하였다. 천이 구조(Transient structural) 방법으로 비선형 물성 데이터를 적용시켜 해석하였다. Table 4는 해석을 수행한 결과를 나타낸 표이며, Fig. 10은 각각의 해석결과를 나타내며, 소성 변형이 발생하지 않았으며 피로파괴와 파손위험이 없는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4 Analysis results of ANSYS

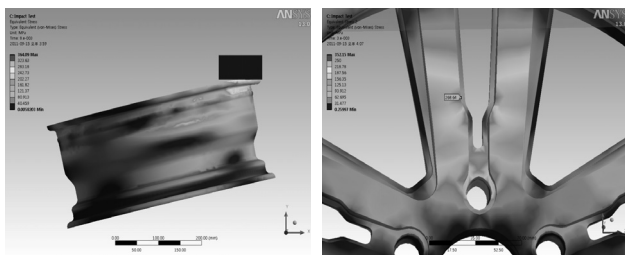
| | Max.stress (Kgf/cm ²) | Safety coefficient | Decision |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------|----------|
| Bending Moment Fatigue | 1301.16 | 1.37 | ok |
| Radial Fatigue | 1228.76 | 1.23 | ok |
| Impact Test | 2738.96 | - | ok |



(a) Bending moment fatigue



(b) Radial fatigue



(c) Impact test

Fig. 10 Analysis of 2 piece al wheel

6. 시제품 알루미늄 휠의 안정성 시험

6.1 2피스 휠 시험 안정성 시험

유한 요소 해석 결과에서 휠의 디자인과 구조적 안정성을 확인 후 실제 마찰 교반용접을 수행하여 개발된 초경량 2피스 알루미늄 휠의 안전성 테스트를 진행하였다. 휠의 안전성 테스트는 크게 주행내구성 시험, 피로내구성 시험, 충격 시험이 일반적이며, 마찰교반용접과 단조 공법에 따라 발생할 수 있는 불순물과 내부 결함을 확인하기 위하여 X-Ray 비파괴 검사를 추가적으로 수행하여 마찰교반 용접을 이용한 알루미늄 휠의 안정성을 확보할 수 있도록 하였다.

6.2 주행내구성 시험 및 결과

휠의 경우, 자동차에 장착되어 자동차의 하중과 엔진의 동력을 전달하는 역할을 한다. 따라서 지속적인 하중을 받고 있기 때문에 파손이 발생할 경우, 치명적인 결과를 초래한다. 따라서 자동차의 주행과 비슷한 상황을 만들어 휠의 안정성을 검증하는 것이 매우 중요하다. Fig. 11은 주행 내구성 실험을 나타내는 그림으로서 휠의 도면 구격에 따라 타이어나 공기압을 설정하여 시험을 수행하며 시험을 수행한 휠의 림과 디스크에 침투탐상을 통하여 균열이 발생



Fig. 11 Durability tests and penetrating tests

Table 5 Parameter of the durability test

| | |
|-------------------------|------------|
| Mileage | 1000000 CY |
| Tire size | 235/65R/18 |
| Tire pressure | 45 Psi |
| Test load | 1,700 Kgf |
| Drum outsource speed | 60 Km/h |
| Wheel Net voting torque | 12 Kg.m |

하지 않아야 한다.

주행 내구성 시험 결과 주행거리 1,000,000 CY와 주행속도 60 Km/h의 조건에서 휠의 림과 디스크에 균열이 나타나지 않았으며 Air 누설이 없을 것으로 확인하였다. Table 5는 마찰 교반용접을 적용하여 생산된 휠의 도면 규격에 따라 주행내구성 시험에 적용된 주요 변수를 나타낸 표이다.

6.3 피로내구성 시험 및 결과

휠의 경우, 자동차의 주행 중 지속적으로 많은 반복하중을 받게 된다. 따라서 반복하중에 의한 피로 파괴 현상이 발생할 수 있기 때문에 피로내구성 시험이 필수적이다. 일반적으로 휠의 피로내구성 시험의 경우, 휠의 도면 규격에 따라 회전수와 모멘트가 결정된다. 또한 시험을 수행한 휠에 침투탐상법을 이용하여 림과 디스크에 균열이 발생하지 않아야 한다.

Fig. 12는 피로 내구성 시험을 나타내는 그림이며, Table 6은 마찰교반용접을 적용하여 생산한 휠의 피로내구성 시험에 적용된 변수를 나타낸 표이다. 시험 결과 120,000 Cy 반복하중에서 마찰 교반용접을 적용하여 생산한 휠의 림과 디스크에 균열이 발생하지 않았다.



Fig. 12 Cornering fatigue test and penetrating tests

Table 6 Parameter of the cornering fatigue test

| | |
|-------------------------|------------|
| Moment | 3.332 N·m |
| Cycle | 120,000 Cy |
| Wheel Net voting torque | 12 Kg.m |



Fig. 13 Impact test

Table 7 Parameter of the impact test

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Tire pressure | 29 Psi |
| Tire size | 215/45R/18 |
| Pendulum drop height | 230 mm |
| Pendulum weight | 694 Kg |
| Impact location | 1.Air Valve 2.Spoke |
| Wheel Net voting torque | 12 Kg·m |
| Impact angle | 13° |

6.4 충격 시험 및 결과

자동차의 경우 주행 많은 충격을 받게 된다. 이러한 충격에 의하여 휠의 파괴가 발생하지 않아야 한다. 따라서 마찰교반용접이 적용된 알루미늄 휠의 안정성확보를 위하여 충격 시험을 수행하였다. 일반적으로 휠의 충격시험은 시험 결과 휠에 균열이 발생하지 않으며, 림과 디스크의 분리가 없어야 된다. Fig. 13은 마찰교반용접이 적용된 알루미늄 휠의 충격 시험을 나타내는 그림이며, Table 7의 충격시험조건으로 시험한 결과 마찰교반용접이 적용된 알루미늄 휠의 균열이 발생하지 않았으며, 림과 디스크의 분리가 발생하지 않아 안전성을 확보하였다.

6.5 X-ray 비파괴 검사 결과

마찰교반 용접의 경우, 틀의 강한 회전으로 인한 모재와의 마찰에 의하여 모재의 소성유동이 발생하여 용접이 가능하다. 또한 마찰교반 용접의 틀의 삽입 지점과 배출 지점에 원형의 결함을 발생하게 된다. 휠의 제작과정에서 이러한 원형 결함 부분은 고려하여 휠의 모체 부분을 절단하여 사용하게 된다.

이러한 일련의 과정에서 휠에 불순물의 혼입이 가능하며, 원형

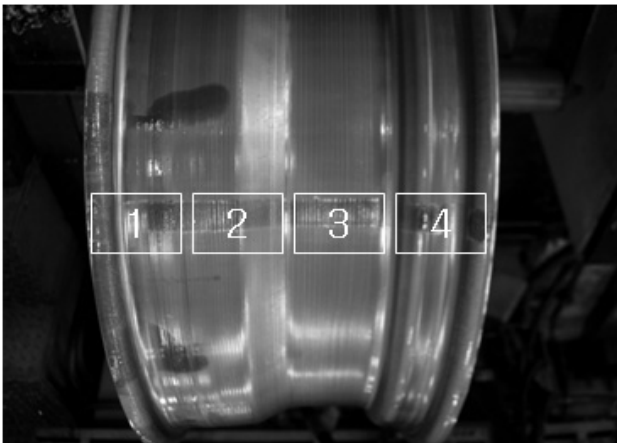


Fig. 14 Sampling part for x-ray inspection

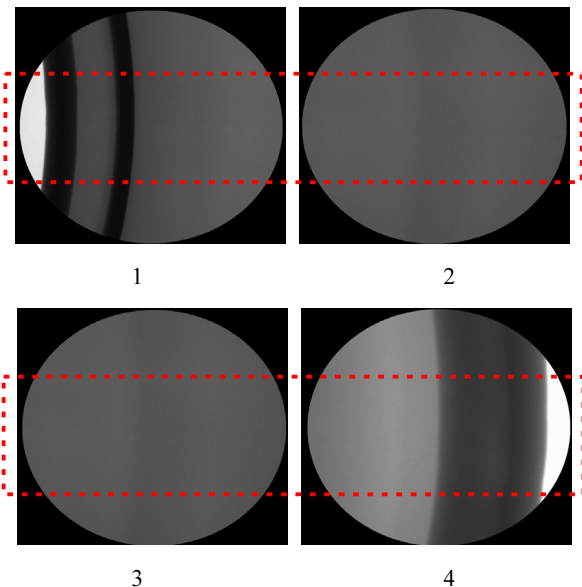


Fig. 15 Result of x-ray test

결합의 제거를 위한 휠의 절단과정에서 균열이 발생할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 이러한 불순물의 혼입과 균열의 발생을 검사하기 위하여 X-ray 검사를 수행하였다. Fig. 14는 마찰교반용접에 의하여 생산된 알루미늄 휠의 X-ray 검사를 위하여 시료 채취 부분을 나타내는 그림이며, Fig. 15는 검사 결과를 나타내며, 빨간색 점선으로 표시한 부분이 실제 마찰 교반이용접이 수행된 부분으로 알루미늄 휠의 내부에 불순물의 혼입이 발견되지 않았으며 내부 결합 또한 발견되지 않았다.

7. 결론

자동차의 경량화와 연비 향상을 위하여 사용되는 알루미늄 휠 생산 공정의 단순화와 원가 절감을 위하여 마찰교반용접을 이용한

휠 생산 과정을 도입하기 위하여 마찰 교반 용접의 최적 조건을 찾기 위한 인장 시험을 수행하였다. 또한 인장시험을 통하여 도출한 최적의 마찰교반용접 조건으로 생산된 알루미늄 휠의 안전성을 확보하기 위하여 주행내구성, 피로내구성, 충격시험과 X-ray 검사를 통하여 마찰 교반용접법을 적용하여 생산한 초경량 2피스 알루미늄 휠의 안전성을 검증하였다. 본 연구를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 마찰교반 용접을 적용하여 2피스 알루미늄 휠 림을 제작하고 이를 이용하여 휠의 완성품 제작이 가능함을 보였다.
- (2) 마찰교반용접을 알루미늄 휠의 생산과정에 도입하여 생산 과정의 단순화와 원가 절감의 효과를 얻을 수 있었다.
- (3) 마찰 교반용접이 적용되어 생산된 휠의 주행내구성, 피로내구성, 충격시험을 수행하여 마찰교반용접을 통하여 생산된 2 Piece 알루미늄 휠의 안정성을 확보하였다.
- (4) 다양한 차종의 주문자형 신형 휠 개발의 용이성과 2피스 알루미늄 휠의 양산화 기술을 확보하였다.

References

- [1] Choi, W. D., Ko, J. B., Gu, G. Y., 2010, Comparative Study on the Fatigue Properties of FSW and MIG Joints of Al 60005 Sheets to Design Railway Vehicles, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 19:5 653-659.
- [2] Kim, C. O., Kim, S. J., 2011, Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of Al-7075-T651 Plate, The Korean Society for Power System Engineering, 15:2 61-68.
- [3] Sato, Y. S., Kokawa, H., Ikeada, K., Enomoto, M., Jogan, S., Hasimoto, T., 2001, Microtexture in Friction Stir Weld of an Aluminum Alloy, Metallurgical and Materials Transactions, 32:4 941-948.
- [4] Fuller, C. B., Manohney, M. W. Calabrese, M. Micono, L., 2010, Evolution of Microstructure and Mechanical Properties in Naturally Aged 7075 and 7075 Al Friction Stir Welds, Materials Science and Engineering, 527:9 2233-2240.
- [5] Han, M. S., Jang, S. K., 2011, Mechanical Properties and Microstructure on Dissimilar Friction Stir Weld of Aluminum Alloys, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 35:1 75-81.
- [6] Goo, B. C., Jung, H. S., 2011, 3D Finite Element Analysis of Friction Stir Welding of Al6061 Plates, Journal of the Korean Welding and Joining, 29:4 435-441.

- [7] Lee, K. G., Bang, K. S., 2010, Interfacial Microstructure of Dissimilar Friction Stir Welds between Al and Ti alloy Sheets, *Journal of the Korean Welding and Joining*, 28:5 507-511.
- [8] Lee, K. G., 2009, Effect of Post Weld Heat Treatment for Crystal Orientation Distribution on Friction Stir Welds of Al-Mg-Si Series Aluminum Alloy Sheets, *Journal of the Korean Welding and Joining*, 27:6 62-67.
- [9] Fonda, R. W., Bingert, J. F., Colligna, K. J., 2004, Development of Grain Structure during Friction Stir Welding, *Scripta Materialia*, 51:3 243-248.