

<응용 논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2020.44.1.049>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

유한요소해석을 이용한 하이브리드 로어 컨트롤 암 설계

남승현* · 김현우*† · 권순찬* · 박성국* · 박인희* · 이영춘*

* (주)일진 하이브리드암 설계팀

Design of Hybrid Lower Control Arm using Finite Element Analysis

Seung Hyun Nam*, Hyun Woo Kim*†, Soon Chan Kwon*, Seong Kook Park*,
In Hee Park* and Yeong Chun Lee*

* Dept. of Hybrid Arm Team, ILJIN

(Received May 24, 2019 ; Revised September 10, 2019 ; Accepted September 30, 2019)

Key Words : Hybrid Arm(하이브리드 암), Lower Control Arm(로어 컨트롤 아암), Lightweight(경량화), Strength(강도), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 본 연구에서는 철판과 플라스틱의 구조적 결합을 이용한 하이브리드 로어 컨트롤 암을 유한요소 해석을 기반으로 개발을 하였다. 하이브리드 컨트롤 암은 철판의 두께를 감소시키고 플라스틱으로 보강함으로써 중량을 절감하고 강도를 보강할 수 있다. 해석 기법을 검증하기 위해 기존 스틸 암의 강도 해석과 시험을 통해 코릴레이션 했으며 검증된 결과를 도출하였다. 하이브리드 로어 컨트롤 암은 longitudinal 방향 강도 22.7kN, lateral 방향 강도 57.43kN으로 기존 스틸 암 대비 중량 21%를 감소시킬 수 있었다. 본 연구의 결과는 하이브리드 암의 이점을 이해하는 데 도움이 될 수 있을 것이다.

Abstract: Using finite element analysis, we developed a hybrid lower control arm having the structural combination of a steel plate and plastic. Hybrid control arms can reduce weight and reinforce strength by reducing the thickness of the steel plate and reinforcing it with plastic. To verify the analytical technique, we performed a correlation between the computer-aided engineering (CAE) analysis and test of the existing steel arm. The hybrid lower control arm has a longitudinal strength of 22.7 kN and lateral strength 57.43 kN. Moreover, we could reduce the weight of the lower control arm. The obtained results are expected to help in understanding the advantages of hybrid technology.

1. 서 론

세계 선진국들은 환경오염의 심각성을 인지하고 매년 각종 환경 연비규제를 강화하고 있다. 환경규제를 충족하지 못할 경우 완성차 기업에서는 기존 초과 차량 대수별 벌금을 부여하는 방식으로 강화된 제재를 받아 미국은 0.1mpg당 5.5달러 벌금을 판매 차량 전체에 부과하는 방안을 세우고 있어 연비향상에 대한 연구 활동은 기업의 수익성에 매우 중요하다.⁽¹⁾ Cheah의 보고서에 의하면 차량 중량 10% 감소는 연료 소비를 약 7% 줄일 수

있다고 보고되었다.⁽²⁾

이외에도 배기가스 저감, 새시 내구성, 가속력, 조향 성능이 향상하는 것으로 알려져 있다.^(1,3) 이에 따라 완성차 기업들은 환경규제를 만족하는 기술력을 확보함과 동시에 재미와 편의성을 겸비한 자동차를 개발함으로써 경쟁력을 확보하기 위해 노력하고 있다. 자동차의 연비, 운동성능, 승차감 등 종합적인 성능향상을 위해 가장 효과적인 방법은 스프링 하부중량(unsprung weight) 경량화이다.

일반적으로 스프링 하부중량(unsprung weight)의 경량화는 상대적으로 위쪽의 상중량(sprung weight)을 가볍게 하는 역할을 하고 서스펜션의 응답성을 높여 스포티한 주행을 가능케 하여 자동차의 운동성을 급격히 높여준다. 특히 승차감은 수직가속도

† Corresponding Author, kimhw@iljin.com

© 2020 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 RMS(Root Mean Square) 값으로 평가되는데, 총 차량 질량이 일정하게 유지될 때, 스프링 하부중량(unsprung weight)이 10% 감소마다 약 sprung mass의 가속도의 RMS가 6% 감소하는 데에 기여한다고 보고되었다.⁽³⁾ 이처럼 승차감 향상에도 기여함을 알 수 있다.

이에 따라 자동차 회사에서는 경량화를 통한 연비 및 운동성능을 향상하기 위하여 알루미늄, 마그네슘 및 CFRP와 같은 경량 복합 재료를 사용하여 스프링 하부중량(unsprung weight)을 줄이는 연구 활동이 활발히 진행되고 있다.

그러나 복합재료, 마그네슘 및 알루미늄으로 제작한 새시 부품은 높은 제조 비용으로 고급자동차 이외에 적용하는 데에 어려움이 많다. 이러한 제품의 고비용의 단점을 해소하고 중량을 절감하는 것이 자동차 업계의 중요한 과제이다.

중량과 비용 절감 방법으로 유리섬유와 혼합된 polyamide 플라스틱을 사용한 사출성형은 서스펜션 링크를 제조하는 가장 저렴한 방법으로 추가 가공이나 표면 코팅이 필요하지 않다고 보고되었다.⁽⁴⁾

최근 polyamide 플라스틱에 유리섬유 함량을 높여 플라스틱의 물성을 확보하고 위상 최적화를 통해 중량을 줄이는 연구가 진행되고 있다. Güler는 polyamide에 유리섬유 60%를 첨가한 PA66-GF60 소재를 이용해 중량을 8.12% 감소한 자동차 후방 도어 힌지를 개발하였다.⁽⁵⁾ 그러나 불충분한 재료 특성으로 인해 큰 복합하중이 작용하는 control arm 제품을 플라스틱 단독으로 제작은 어렵다고 보고되었다.⁽⁴⁾

플라스틱 서스펜션의 단점을 보완하는 방법으로 박판 금속을 추가하는 하이브리드 방법이 고안되었다. 판금은 링크에 가해지는 장력과 압축력에 저항하며 불충분한 성능을 확보하며 판금 주위에 성형된 플라스틱은 볼 조인트 또는 고무 부싱 조인트의 장착표면을 제공하면서 링크에 필요한 강성을 확보한다고 보고되었다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 유한요소 기법을 통해 시중에 유통되고 있는 스틸 로어 컨트롤 암과 하이브리드 로어 컨트롤 암의 성능을 확인 및 검증하고 중량 절감 기여도를 확인하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 부품 분석

프론트 로어 컨트롤 암은 맥퍼슨 스트럿 구조의 현가장치에서 사용되며 너클과 바디를 연결하여 외부로부터 들어오는 하중을 흡수하고 범프 리바

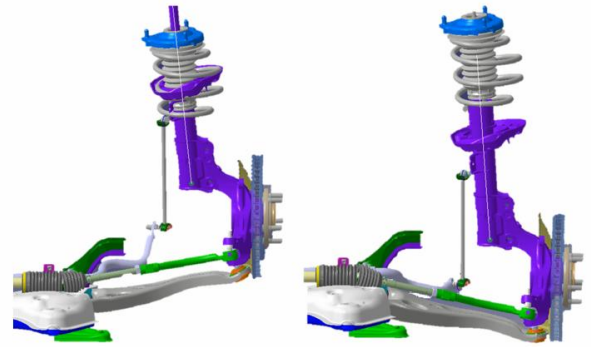
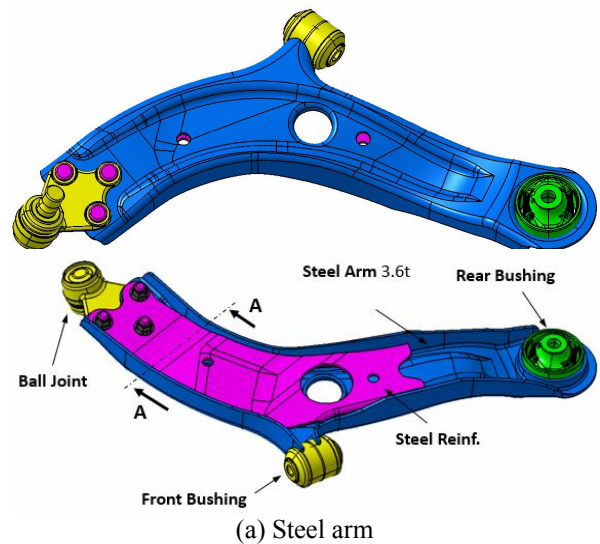
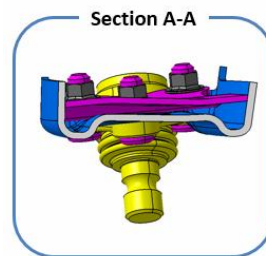


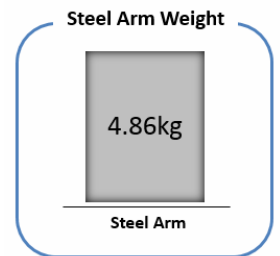
Fig. 1 Bump and rebound of MacPherson strut



(a) Steel arm



(b) Steel arm section



(c) Steel arm weight

Fig. 2 Steel arm is reverse designed by 3D scanner

운드를 하며 타이어를 노면에 접지시킴으로써 차량의 조향 및 안전성에 큰 역할을 한다(Fig. 1). 300mm를 넘는 크기를 가진 로어 컨트롤 암은 일체형 판금(one-piece sheet metal)으로만 요구되는 하중을 만족하기 어렵다. 이와 같은 경우 판금의 필요한 최소 두께는 4mm를 초과해야 하며 이 두께는 응력이 더 낮은 곳에서도 전체적으로 사용해야 한다. 이에 따라 무게가 증가하고 다양한 성형 공정이 어렵다고 보고되었다.⁽⁴⁾

결과적으로 효과적으로 성능을 확보하기 위해서 두 개 이상의 성형 판금을 용접하여 제작한다(Fig.

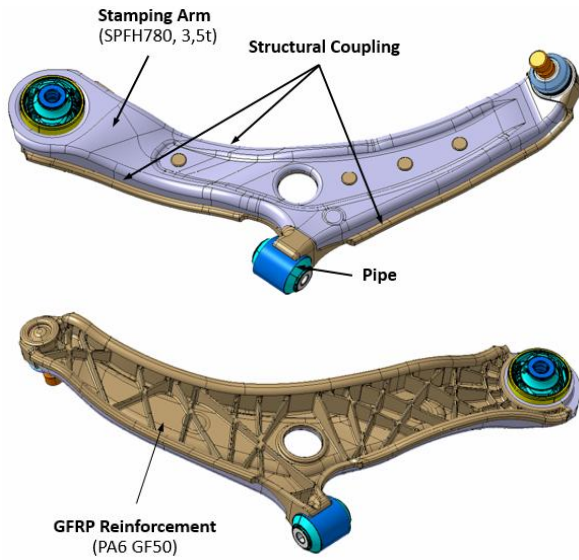


Fig. 3 Hybrid arm design

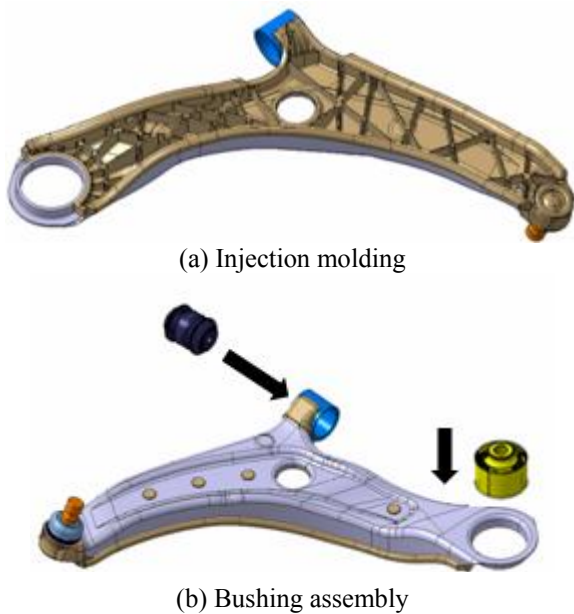


Fig. 4 Hybrid arm assembly process

2(b)). 그러나 용접 비용 및 용접하기 위한 지그와 공구 비용이 추가되며 용접에 의한 품질 제조 산포가 발생하는 단점이 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 하이브리드 암은 스틸 암에 사용되는 보강판을 없애면서 용접량을 줄이고 판금의 두께를 줄여 중량을 확보하고 부족한 강도를 확보하기 위해 플라스틱 리브를 세워 제품의 성능을 확보하였다(Fig. 3). 이를 만족하기 위해 인장강도 798MPa를 가진 판금 SPFH780, 글라스파이버 50% 함량 된 PA6-GF50 플라스틱을 선택하였다.

2.2 하이브리드 암 개발 방법

하이브리드 암 해석모델링 작업에 앞서 제품구성 및 제작 방법에 대한 이해가 필요하다. 프론트 로어 컨트롤 하이브리드 암은 steel arm sheet, plastic, ball joint case, front bush pipe, ball stud, dust cover, ball race, ring clip, front bush, rear bush로 구성되어있다. 하이브리드 암을 제작하는 방법으로는 스틸 판을 프레스 가공 후에 rear bush가 압입 될 수 있도록 버링 작업을 한다. 제작된 steel arm sheet는 ball joint case와 front bush pipe와 용접되고 플라스틱 사출 금형에 삽입 후 플라스틱 인서트 사출을 한다. 이후 front bush pipe와 rear burring 부에 bush를 압입 함으로써 최종 제품이 만들어진다(Fig. 4).

하이브리드 암의 성능을 스틸 암 성능과 비교검증을 다음과 같이 진행하였다. 첫 번째, 스틸 암을 3D scan 하여 역설계하여 비선형 강도해석을 진행하고 좌굴 시험 결과와 비교하여 해석 방법을 검증하였다. 두 번째 하이브리드암을 설계 및 해석하여 최적의 설계를 도출한 후 제품을 제작하였고 강도시험을 통해 제품의 성능을 검증하였다. 이때 하이브리드 암 설계 시 차량 좌표계에서 스틸 암의 하드 포인트와 동일한 위치를 가지도록 설계하였으며 주변 파트와 간섭이 일어나지 않는 범위에서 설계하였다.

2.3 유한요소 모델

기존 제품에 대한 기계적 성능 비교 최적 디자인을 도출하기 위해 제품의 구조해석을 실시하였다. 플라스틱 리브 형상 최적화를 위해 Inspire2017을 사용하였고 유한요소해석의 전후 처리 프로그램으로 Hyperworks® ver. 17과 자동차 업계에서 범용적으로 사용하는 ABAQUS Standard™ ver. 6.13(Simulia Corp., U.S.A) 프로그램으로 Implicit, 정적 비선형해석을 진행하였다.

전반적으로 3D element는 Tetra C3D10 2차 요소를 사용하였으며 비선형 물성을 적용하였다(Fig. 5). Table 1과 2는 시편 인장시험을 통해 스틸 암과 하이브리드 암을 구성하는 스틸과 플라스틱 소재에 대한 기계적 물성치를 나타내었다.

또한, front bush와 rear bush 모델은 front bush pipe 내측과 front hard point에 위치한 노드/rear burring 부 내측 면과 rear hard point에 위치한 노드를 각각 REB3 element로 연결시켰다. 경계조건이 작용하는 다른 노드와 connector element로 각각 연결하였고 비선형 물성 시험데이터를 기반으로 connector element(spring element)에 적용하여 bush의 움직임

Table 1 Properties of steel arm material

| Properties | Steel arm |
|---------------------------------|-----------|
| | SPFH 590 |
| Young's modulus (MPa) | 2.1E5 |
| Poisson's ratio | 0.29 |
| Density (kg/mm ³) | 7.85E-9 |
| Yield strength (MPa) | 475 |
| Ultimate tensile strength (MPa) | 687 |

Table 2 Properties of hybrid arm materials

| Properties | Hybrid arm | |
|---------------------------------|------------|----------|
| | SPFH 780 | PA6-GF50 |
| Young's modulus (MPa) | 2.1E5 | 1.6E4 |
| Poisson's ratio | 0.3 | 0.32 |
| Density (kg/mm ³) | 7.85E-9 | 1.5E-9 |
| Yield strength (MPa) | 677 | - |
| Ultimate tensile strength (MPa) | 798 | 235 |

을 표현하였다(Fig. 5(c)).⁽⁶⁾ 그리고 ball joint case의 내측 면과 하드 포인트를 rigid element로 연결하였다. 또한 ball joint를 구성하는 ball stud, ball race, ring clip, dust cover는 압의 성능에 영향을 주지 않는다고 판단하여 ball joint case로만 간단히 모델링하였다.

2.3.1 Steel LCA(Lower Control Arm) 유한요소모델

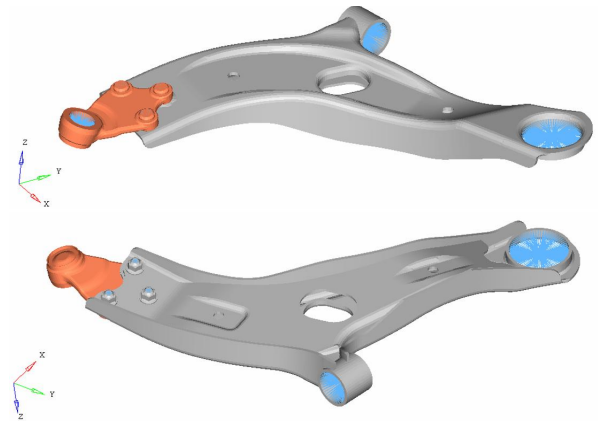
스틸 암은 SPFH590으로 스틸 박판과 보강판이 용접되고 ball joint와 3 point bolting으로 이루어져 있다. 모델을 단순화하여 작업하기 위해 볼 조인트를 단순히 구성하였으며 bolt에서 좌굴이 발생하지 않을 것으로 판단하여 bolt와 맞닿는 내부면을 rigid로 연결하여 고정하였다(Fig. 5(a)).

2.3.2 Hybrid LCA(Lower Control Arm) 유한요소모델

하이브리드 암은 SPFH780인 스틸과 PA6-GF50 플라스틱의 구조적 결합으로 이뤄진 모델이다. Steel arm sheet와 ball joint case, front bush pipe가 용접되는 면은 노드를 공유하여 결합하였으며 plastic과 steel의 접촉조건으로 general contact, 마찰계수는 0.2를 적용하였다(Fig. 5(b)).

2.4 하중 조건 및 구속 조건

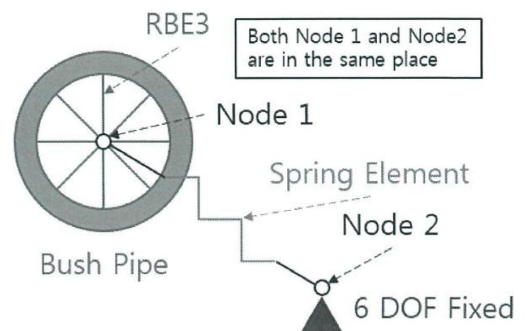
LCA는 차량이 가속 및 감속할 때 바퀴 쪽에서 longitudinal 방향으로 힘이 작용하고 가속보다 감속할 때 작용하는 힘이 크다. 이때 작용하는 힘은 후방으로 작용하는 하중이다. 그리고 차량이 선회할 때 바퀴 쪽에서 lateral 방향으로 힘이 작용하고



(a) Finite element model of steel arm



(b) Finite element model of hybrid arm



(c) CAE bush model detail

Fig. 5 Finite element model of hybrid arm

차량 내측으로 힘이 작용한다(Fig. 6). 이와 같은 하중을 적용하였을 때 제품의 안전성을 판단하기 위해 시험 방법에 대한 이해가 필요하다.

첫째, front & rear bush를 압입한 LCA를 차량 좌표와 동일한 지그에 고정하고 ball joint의 ball stud를 vertical 방향을 고정하고 longitudinal과 lateral 방향으로 힘을 적용하였다(Fig. 7).

둘째, 상온에서 시험한다. 해석 시 시험 결과와

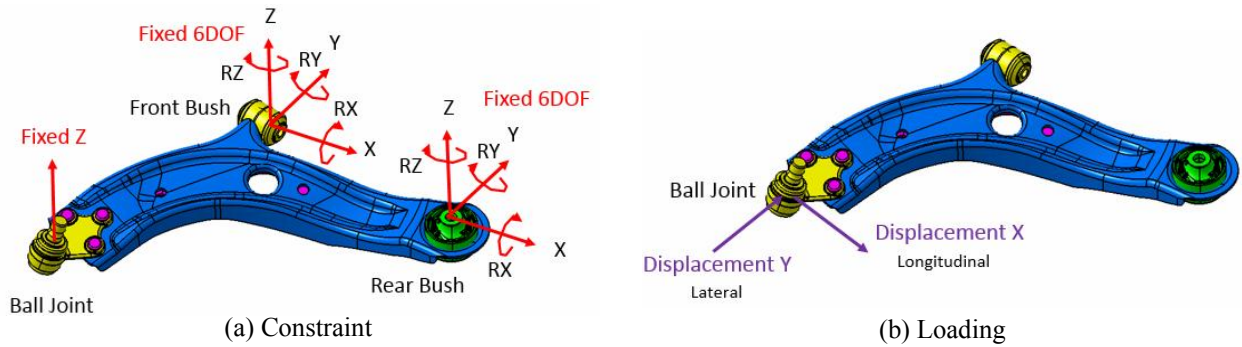


Fig. 6 Boundary condition

동일한 결과를 가져오기 위해서 front & rear bush로 표현한 connector element의 6자유도를 구속하고(Fig. 5(c)) ball joint case와 연결된 rigid element를 vertical 방향으로 구속 후 longitudinal과 lateral 방향으로 각각 강제 변위를 이동 시켜 반력을 추출한다. 이때 플라스틱 물성은 상온 건조 물성을 적용하였다. 위의 모든 경계조건은 스틸 암과 하이브리드 암 해석 시 동일하게 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

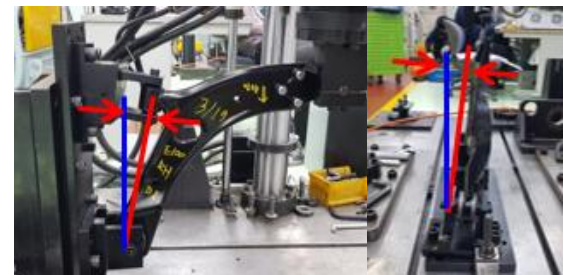
3.1 제품의 안전성 판단 기준

LCA의 안전성을 판단하는 방법은 실제로 차량으로 들어오는 복합하중에 의해 LCA 단품의 ball joint, front bush, rear bush, 세 곳에서 다양한 하중이 고려되어야 한다. 그러나 차량에 직접 장착하여 시험하는 것은 많은 시간과 비용이 발생됨에 따라 LCA 단품 시험으로 강도시험을 통해 제품의 성능을 판단한다.

우리가 시험을 통해 확인하고자 하는 인자는 LCA의 강도(kN)이다. 강도는 외부에서 바퀴를 통해 하중이 전달될 때 제품이 외력을 버티고 차량의 안전을 판단할 수 있는 중요한 인자이다. 즉 차량의 안전성을 확보하기 위해 높은 강도를 가지는 것이 좋다. 그러나 기준을 넘는 높은 강도(kN)를 가진 제품은 무거운 중량을 초래하고 최적 설계와 떨어진 과설계로써 비용이 비싸지는 우려가 있다. 그래서 차량의 중량과 운동성능에 맞는 강도를 가지는 것이 중요하다.

Lee의 보고서에 의하면 Kerb impact test(5G)할 때 LCA의 ball joint에서 후방방향으로 작용하는 힘이 critical buckling load(1,654kgf)로 정의하였고 1,654kgf의 힘이 작용하였을 때의 LCA를 평가하였다.⁽⁷⁾

‘1G=G.V.W 시 front 분배 하중/2’로서 한 개의 LCA에 작용하는 힘이다. Lee의 보고서와 같이 1G의 후방하중은 325kgf로 가정하고 6G에서 파손이



(a) Assembly condition



(b) Longitudinal strength test



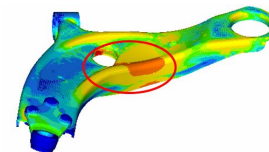
(c) Lateral strength test



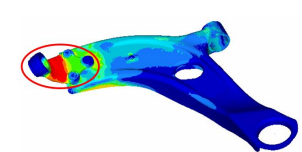
(d) Longitudinal test result



(e) Lateral test result



(f) Longitudinal CAE result



(g) Lateral CAE result

Fig. 7 Comparison buckling result between test and CAE

발생하지 않는 hybrid LCA 개발을 목표로 안전성 평가 기준을 후방강도시험이 후방하중 $325 \times 9.8 \times 6 \approx 19\text{kN}$ 이상 가지는 것으로 정의하였다.

3.2 모델의 타당성 검증

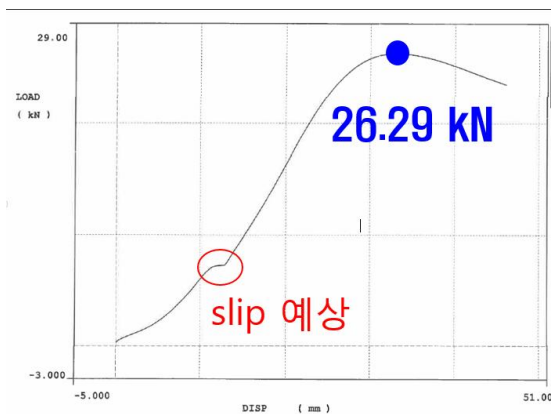
LCA 유한요소모델을 시험 및 해석 연구 결과와 비교를 통해 해석의 유효성을 검증하였다.

스틸 암의 강도시험은 차량장착 상태와 동일한 위치로 고정하였고(Fig. 7(a)) longitudinal, lateral 방향으로 각각 강제 변위를 적용하여 제품이 가지는 반력을 통해 제품의 강도를 확인하였다(Fig. 7(b)와 (c)).

스틸 암 longitudinal 방향 시험 결과 26.29kN, 해석 결과 24.37kN으로써 시험과 해석의 오차율은 7.3%, lateral 방향 시험 결과 52.95kN이 나왔고 해석 결과 71.44kN으로써 시험과 해석의 오차율은 34.9%로 나왔다(Table 3과 Fig. 8).

Table 3 Steel arm buckling result

| Steel arm | Test | CAE | Rate |
|--------------|----------|----------|----------|
| Longitudinal | 26.29 kN | 24.37 kN | - 7.3 % |
| Lateral | 52.95 kN | 71.44 kN | + 34.9 % |



(a) Test result



(b) CAE result

Fig. 8 Steel arm longitudinal buckling result

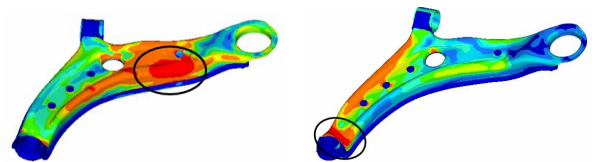
Longitudinal 방향에 대해서 시험과 해석은 동일한 부위가 힘을 받아 변형을 했지만(Fig. 7(d)와 (f)), lateral 방향은 시험에서 ball stud에 변형이 되면서 해석에서 고려하지 않았던 부위에 대해 강도 값의 차이를 가져왔다고 판단된다(Fig. 7(e)와 (g)). Longitudinal 방향으로의 시험과 해석은 같은 부위에서 좌굴이 발생하였고 결과값 차이는 7.3%로서 해석의 유효성을 확인할 수 있었다.

3.3 하이브리드 암 해석 및 시험 결과

스틸 암 해석 및 시험을 통해 해석방법의 유효성을 확인한 검증된 유한요소 해석 기법으로 하이브리드 암에 대한 최적 설계를 하였다.

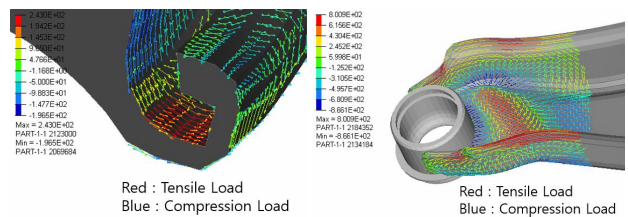
하이브리드 암 강도해석 결과 longitudinal 방향 22.29kN, lateral 방향 85.25kN이 나왔다.

해석 결과 longitudinal 방향으로 강제 변위를 적용하였을 때 타이어 패치부 쪽 플라스틱 리브가 인장력을 받아 스틸과 플라스틱의 구조적 결합을 가지는 플랜지 부분에서 스틸 박판 인장강도 (798MPa)보다 플라스틱의 인장강도(235MPa)를 넘는 응력이 작용하여 플라스틱이 파괴됨을 확인할 수 있었다(Fig. 9(c)).



(a) Longitudinal CAE result

(b) Lateral test result



(c) Longitudinal CAE result detail

(d) Lateral CAE result detail



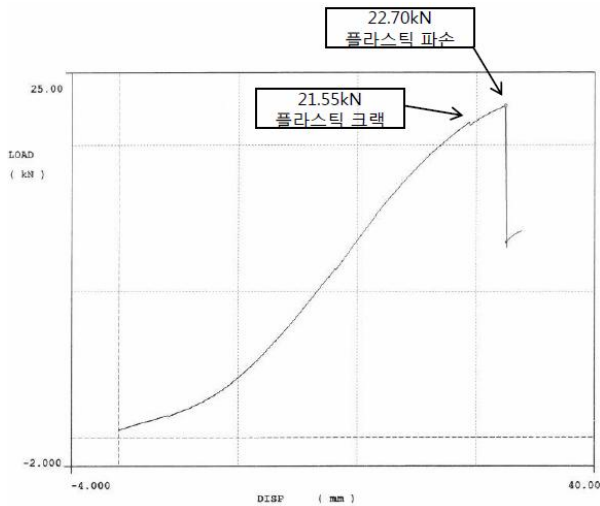
(e) Longitudinal strength test

(f) Lateral strength test

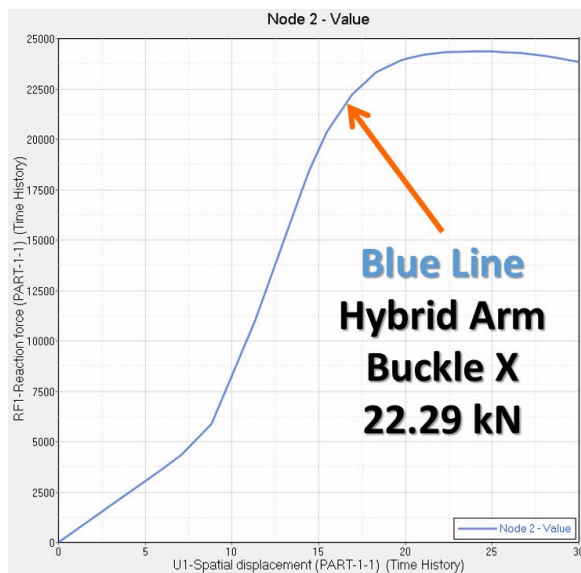
Fig. 9 Comparison buckling result between test and CAE

Table 4 Hybrid arm buckling result

| Hybrid arm | Test | CAE | Rate |
|--------------|----------|----------|----------|
| Longitudinal | 22.70 kN | 22.29 kN | - 1.8 % |
| Lateral | 57.43 kN | 85.25 kN | + 48.4 % |



(a) Test result



(b) CAE result

Fig. 10 Hybrid arm longitudinal buckling result

Lateral 방향으로 강제 변위를 적용하였을 때 볼 조인트 부에 스틸 박판 상부는 압축, 하부는 인장을 받는 좌굴 모드를 보이며 플라스틱 인장강도 (235MPa)보다 스틸 박판 인장강도(798MPa)를 넘는 응력이 작용하여 스틸 박판이 파괴되는 결과를 보였다(Fig. 9(d)).

Table 5 Comparison buckling result between steel arm and hybrid arm

| Test | Longitudinal | Lateral | Weight |
|------------|--------------|----------|---------|
| Steel arm | 26.29 kN | 52.95 kN | 4.86 kg |
| Hybrid arm | 22.70 kN | 57.43 kN | 3.84 kg |

이를 검증하기 위해 샘플을 직접 제작하여 스틸 암 시험조건과 동일하게 강도시험을 하고 해석 값과 비교하였다(Fig. 9(c)와 (e); Fig. 9(d)와 (f)).

시험 결과 longitudinal 방향 22.70kN, lateral 방향 57.43kN을 나타냈다(Table 4와 Fig. 10). Longitudinal 방향은 해석과 시험의 파괴 모드가 유사함을 확인하였고 lateral 방향은 스틸 암과 같이 ball stud에서 변형이 발생하면서 해석에서 고려하지 않았던 부위로서 강도 값의 차이를 가져왔다.

3.4 스틸 암과 하이브리드 암 모델의 비교

스틸 암과 하이브리드 암의 강도와 이에 따른 중량을 비교하였다(Table 5).

하이브리드 암은 longitudinal 방향으로 19kN을 넘는 강도 값을 가지며 후방하중에 대한 안전성을 확보하였다. 또한 lateral 방향으로 스틸 암 대비하여 높은 강도 값을 가지는 것으로 확인할 수 있었다. 그리고 lateral 방향 강도는 ball stud의 열처리, 형상 및 재질을 바꿔 강도를 추가로 높일 수 있을 것으로 생각된다.

제품의 강도를 높여 추가적인 중량 절감을 위하여, 더 높은 인장강도를 가진 POSCO 회사 제품인 기가 스틸에 대해 검토가 되었으나 낮은 연신율로 인해 복잡한 형태를 가진 LCA에 대한 제조성이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이외에 높은 인장강도와 높은 연신율을 가진 POSCO의 TWIP 강이 고려되었으나 현재까지는 높은 소재 비용으로 인해 적용 시기가 이르다고 판단하였다.

하이브리드 암은 효과적인 중량 절감을 위해 볼 조인트 커넥터 타입을 일체형으로 제작, 높은 강도를 가진 SPFH780 소재를 성능을 확보하고 이용함으로써 보강판을 제외함으로써 중량 절감을 하였을 뿐만 아니라 용접공정을 줄여 용접 품질 문제를 줄일 수 있었고 제작비용의 상승을 줄일 수 있다. 본 연구를 통해 하이브리드 암은 스틸 암에 대비하여 중량 21%를 절감할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 중량

21%를 절감하고 안전성을 확보한 하이브리드 암을 개발하였다.

스틸 암과 하이브리드 암은 각각 longitudinal, lateral 방향으로 비선형 강도 해석을 진행하였으며 강도시험을 통해 해석 값을 비교검증하였다. Longitudinal 방향으로 스틸 암 7.3%, 하이브리드 암 1.8% 차이로 유사한 값을 보였고 lateral 방향으로 강도시험은 해석에 구현되지 않은 stud가 휘어지면서 해석과 차이를 보였다.

또한 하이브리드 암은 강도시험 결과 longitudinal 방향으로 22.70kN으로 6G의 하중에서 안전성을 확보하였다.

Longitudinal 방향으로 좌굴 시 하이브리드 암의 플라스틱 리브는 높은 하중을 받는 곳에 위치하여 스틸 박판이 받는 응력을 분산시켜주고 좌굴이 발생하는 것을 지지해주어 성능을 효율적으로 확보하는 데에 기여한다.

향후 하이브리드 암의 더 높은 성능 확보를 위해, 플라스틱 리브 최적화 연구, 플라스틱이 온도와 습도에 따른 물성 변화와 creep이 하이브리드 암 성능에 미치는 영향에 대한 연구 활동으로 이어져야 할 것이다.

본 연구의 결과는 하이브리드 암을 개발하는 프로세스를 이해하는 데에 도움이 될 수 있을 뿐만 아니라 유한요소해석으로 검증하는 방법을 구현하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌 (References)

- (1) Jeoung, S. K. and Ha, J. U., 2006, "Lightweighting Technology Development and Trends in Automotive," *Auto Journal*, Vol. 40, No. 8, pp. 30~34.
- (2) Cheah, L. W., 2010, "Cars on a Diet: The Material and Energy Impacts of Passenger Vehicle Weight Reduction in the US," *Doctoral Dissertation*, Engineering Systems Division, Massachusetts Institute of Technology, pp. 117~121.
- (3) Hrovat, D., 1988, "Influence of Unsprung Weight on Vehicle Ride Quality," *Sound and Vibration*, Vol. 124, No. 3, pp. 497~516.
- (4) Heiβing, B. and Ersoy, M., 2011, *Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives*, 2nd Edition, Mercedes Druck, Berlin, Germany, pp. 295~296.
- (5) Güler, T., Demirci, E., Yıldız, A. R. and Yavuz, U., 2018, "Lightweight Design of an Automobile Hinge Component using Glass Fiber Polyamide Composites," *Materials Testing*, Vol. 60, No. 3, pp. 306~310.
- (6) Kim, D. S., Mun, K. J., An, J. H., Moon, H. and Kim, H. Y., 2011, "Bush Modeling for Buckling Analysis of Lower Control Arm," *The Korean Society of Automotive Engineers*, pp. 1728~1730.
- (7) Lee, D.-C. and Kim, Y.-I., 2010, "Design of Front Lower Control Arm Considering Buckling Strength and Durability Strength," *J. Korean Society of Industrial Application*, Vol. 13, No. 2, pp. 77~84.