

서스펜션 링크의 부시 압입에 따른 내구 영향도 연구

이 규 식[†]

현대자동차 가속내구개발팀

Study of Durability Effect Parameter in Inserting Bush into Suspension Link

Kyusik Lee[†]

Hyundai Motors Accelerated Durability Development Team

Purpose: In recent years, weight reduction for improving fuel efficiency of the vehicle and cost reduction have been developed. The structure of suspension link is widely used as a single plate press structure which can reduce process and weight compared to existing pipe welding method. However, it was found that the lifetime of a single plate press structure is determined by initial defects that occurred during initial manufacturing rather than fatigue damage caused by driving.

Methods: I research the mechanism of failure phenomenon of the single plate press assist arm of rear wheel. In addition, I investigate durability effect parameters to determine the link lifetime in inserting bush into single plate press process through durability test.

Conclusion: I discover significant durability effect parameter in inserting bush into single plate press process. It is expected that the durability can be improved by suggesting a bush inserting process inspection guide for similar suspension link like single plate press structure.

Keywords: Single plate press, Durability, Inserting force, Mean stress, Deformation

1. 서론

자동차의 서스펜션(Suspension)은 타이어와 차체를 연결해주는 구조장치이다. 일반적으로 후륜 서스펜션으로는 여러 개의 링크로 차량을 지지하여 다양한 주행노면 조건에도 차량 거동을 적정하게 유지하고 주행성능을 향상시키는 멀티링크 서스펜션을 많이 사용하고 있다. 멀티링크 서스펜션을 구성하는 각종 링크(어퍼암, 로워암, 어시스트암, 트레일링암 등)는 자동차의 하중과 운동을 전달해주는 부품으로써 주물이나 프레스로 제작되는 몸체와 노면의 진동과 소음을 흡수해주는 부시(Bush)로 이루어져 있다.

한편, 자동차 업계에서는 차량의 연비향상을 위한 중량절감과 가격 경쟁력을 위한 생산 원가절감이 요구되고 있다. 이에 따라 차량 서스펜션 구조도 주물 부시 파이프 용접식에서 단판 프레스 압입식으로 바뀌고 있는 추세다. 주물 부시 파이프 용접식이란 주물로 제작한 링크의 몸체와 O자형 부시 파이프를 용접으로 연결한 구조다. 반면, 단판 프레스 압입식은 단판 프레스 몸체에 부시를 압입하는 구조로써 용접 공정이 없을 뿐 아니라 가벼운 단판으로 링크의 몸체를 구성한다. 단판 프레스 압입식 링크는 기존 방식만큼의 강성과 내구력을 갖추기 위해 링크 몸체를 고장력 강판으로 제작한다. 하지만 고장력 강판인 단판 프레스

[†] 교신저자 kyus@hyundai.com

2017년 5월 29일 접수; 2017년 6월 27일 수정본 접수; 2017년 6월 28일 게재 확정.

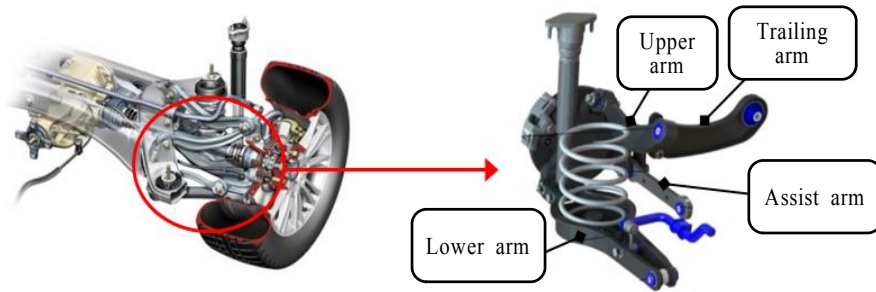


Fig. 1 Rear multi-link suspension



Fig. 2 Casting-pipe welding method



Fig. 3 Single plate press method

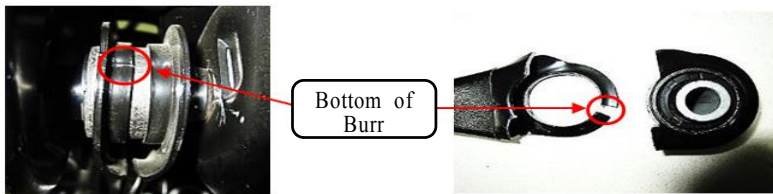


Fig. 4 Failure in burr area of single plate press link

스에 부시를 압입 할 경우 <Fig. 4>와 같이 압입에 의한 과도한 힘에 의해 링크 몸체에 초기 변형이나 미세 크랙을 발생시키고, 이 표면결함에 의해 링크의 내구성능을 저하시킨다.

본 논문에서는 대표적인 중형 차량의 후륜 어시스트암을 이용하여 단판 프레스 부시 압입 공정에서 발생하는 링크 몸체의 Failure(크랙 및 파단) 발생 메커니즘을 분석하였고 이를 통해 링크 수명에 영향을 줄 수 있는 압입 과정상의 내구력 저하 인자를 도출하고, 시험 평가를 통해서 그 주요 인자를 규명하고자 한다.

2. 이론

2.1 단판 프레스 압입식 링크의 부시 압입 공정

<Fig. 5>와 같이 단판 프레스 압입식 링크의 부시는 부시 압입기를 통해 링크 몸체에 압입된다. 이때 작용하는 압입력은 1톤에서 3.5톤까지 가해지게 되고, 압입 과정에서 단판 프레스로 제작된 링크 몸체가 압입력에 의해 변형되는 것을 방지하기 위해 <Fig. 6>과 같은 C형 클램프 지그를 링크에 삽입하고 압입한다.



Fig. 5 Inserting bush process



Fig. 6 C-type clamp jig

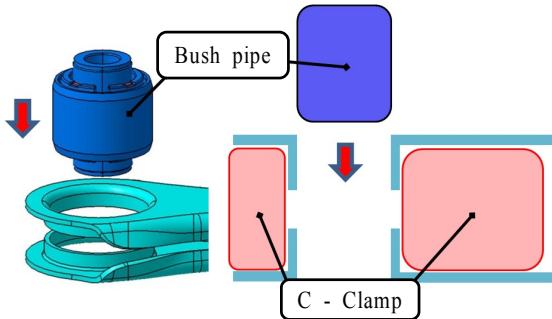


Fig. 7 Overview of inserting bush

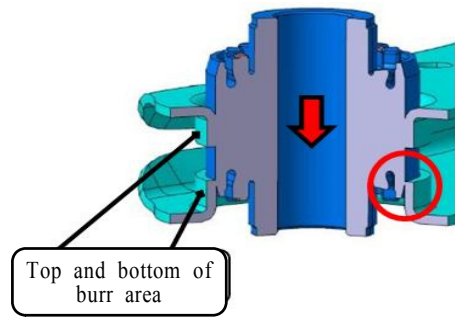


Fig. 8 Overlap between burr and bush

전체적인 개요도이다. 일정 수치 이상의 압입력을 유지하기 위해 부시가 압입되는 링크 버링부의 사이즈는 부시 파이프 외경보다 작게 설계되어 있다. 이에 <Fig. 8>과 같이 부시 파이프 돌출부와 링크 버링부는 압입 시 간섭이 일어나며 억지끼움 방식으로 제작된다. 이 과정에서 링크 버링부에 초기 잔류응력 및 변형이 발생될 수 있고, 이는 링크의 크랙 발생 및 내구력 부족 현상을 일으킬 수 있다.

2.2 단판 프레스 어시스트암의 주행 하중 분석

압입 조건에 따른 단판 프레스 어시스트암의 피로 수명을 확인하기 위하여 단판 내구 시험 조건을 설정하고자 하였다. 이를 위해 어시스트암이 주행 시 받는 하중을 분석하고자 한다. 후륜 어시스트암과 로워암은 캐리어와 크로스멤버에 의해 양단이 구속되어 있다. 주행 시 후륜에 하중이 가해지면 각 링크로 하중이 분산, 전달되어 휠의 거동을 제한하여 안정적인 주행을 가능하게 한다. 특히, 주 하중인 전후력이 후륜

휠에 입력되면 <Fig. 9>, <Fig. 10>과 같이 두 링크는 차량의 상하 방향인 M_z 모멘트를 받게 되고 양단이 구속되어 있는 어시스트암은 인장력, 로워암은 압축력을 받게 된다.

위 메커니즘을 토대로 차량에 로드셀화된 어시스트암을 장착하여 내구 노면에서 링크가 받는 실제 하중조건을 계측하였다. 계측 결과, <Fig. 11>과 같이 후륜 어시스트암이 받는 최대 인장력과 압축력은 각각 1,325kgf와 -425kgf로 나타났다. 이를 토대로 <Fig. 12>의 단축 유압시험기(MTS社, Model No. 244.22, Capacity 100kN)를 이용하여 최대 인장, 압축 조건으로 어시스트암의 내구 평가 기준을 마련하였다. 상세조건은 <Table 1>과 같으며 2Hz의 정현파로 인장, 압축하중을 가진하였고 시험 중 링크에 크랙이나 변형이 발생하는 시점을 파악하여 내구수명을 획득하였다. 단, 상기 시험조건은 특정 중형차량의 조건으로써 차종 및 차량 무게, 서스펜션 타입에 따라 링크가 받는 입력하중은 다르게 나타날 수 있다.

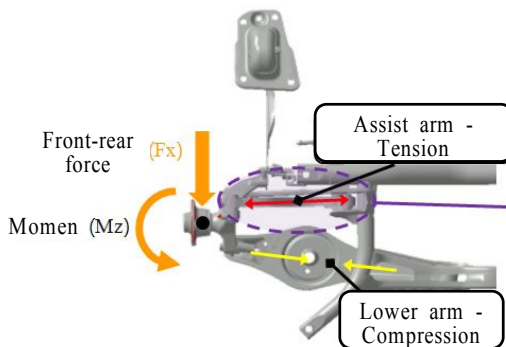


Fig. 9 Load distribution of rear link applying front-rear force

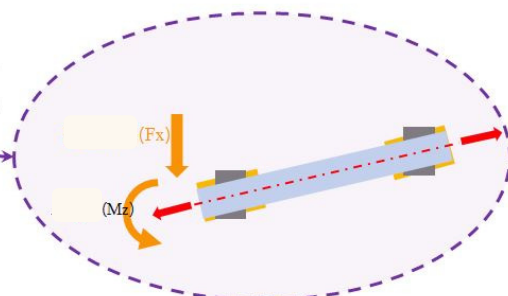


Fig. 10 Load mechanism of assist arm

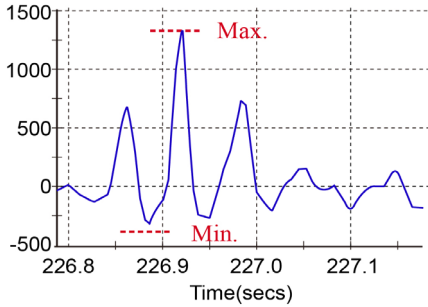


Fig. 11 Input load of assist arm on test road

Table 1 Loading condition of uniaxial test

Load	Frequency
450 ± 875 kgf	Sine wave, 2Hz
Tension: 1,325 kgf	
Compression: -425 kgf	

3. 실험

3.1 부시 압입력과 내구 수명

부시 압입력은 부시가 프레스 몸체에 압입될 때 가해진 힘이고, 이탈력은 부시를 프레스 몸체에서 분리시킬 때 필요한 힘이다. 이 때 압입력은 이탈력과 비

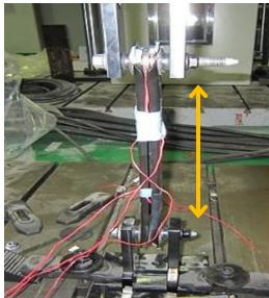


Fig. 12 Uniaxial hydraulic tester



Fig. 13 Servomotor system in inserting bush

례관계를 갖는데, 이탈력이 부족한 경우 부시가 링크에서 쉽게 이탈되어 차량 거동을 불안정하게 하고 탑승자 안전에 위협을 줄 수 있다. 이에 따라 제조사들은 일정 수준 이상의 압입력을 확보하기 위해서 <Fig. 8>과 같이 부시 파이프 외경과 링크의 버링부 내경의 사이즈를 오버랩 시켜 억지끼움 방식으로 부시를 압입하게 된다. 반면, 과도한 부시 압입력은 링크 몸체의 버링부에 큰 초기 응력을 부하하게 되고 이는 링크의 인장력이 가해질 때 버링부가 받는 응력을 크게 증가시켜 링크의 균열을 발생시킬 소지가 있다. 링크의 압입 공정 시 가해진 압입력은 <Fig. 13>과 같이 부시 압입기의 서보 모터 시스템을 통해 측정되고 기록된다.

따라서 부시 압입력에 따른 링크 내구 수명 상관성을 확인하기 위해 1.3톤에서 3.3톤까지의 다른 압입력이 가해진 15개의 링크로 내구 시험을 진행하였다. 이를 위해 <Fig. 12>의 유압시험기를 이용하여 내구 평가를 수행하였다.

결과는 <Fig. 14>와 같다. 압입력과 링크의 내구 수명과의 상관성을 객관적으로 판단하기 위해 통계적인 상관관계를 나타내는 지수인 상관계수 R 값을 도출하였다. -1 (음의 상관성) $\leq R \leq 1$ (양의 상관성), $R \approx 0$ (상관성 없음). 그 결과, 상관계수 R 값이 0.0400으로 부시 압입력과 링크의 내구 수명과의 상관성은 매우 낮다는 것을 알 수 있다. 또한, <Fig. 14>의 표시된 부분과 같이 비슷한 압입력이 가해진 링크들의 내구 수명이 서로 큰 차이를 보였고, 이를 통해 부시 압입력이 아닌 다른 인자가 링크의 내구 수명을 결정한다는 것을 알았다. 그러므로 부시를 압입할 때 부하된 부시 압입력의 크기와 링크의 내구 수명은 상관성이 없음을 알 수 있다.

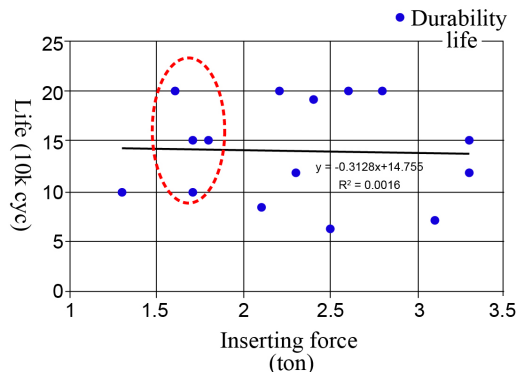


Fig. 14 Lifetime of link by inserting force

3.2 버링부 초기 변형율과 내구 수명

<Fig. 8>, <Fig. 15>와 같이 부시가 프레스에 압입될 때 부시 파이프 외경보다 좁은 링크의 버링부는 억지끼움에 의해 인장응력을 받게 된다. 이는 버링부에 Mean stress(평균 왜력)을 부하하게 되고 인장응력에 대한 허용응력 크기와 Cycle(횟수)이 줄어들게 되어 피로 수명을 단축시킨다(평균 왜력 영향). 부재의 평균 왜력은 버링부의 초기 변형율로 계측할 수 있으며, 이를 위해 <Fig. 15>와 같이 버링부에 스트레인게이지를 부착하여 부시 압입 과정에서 가해진 초기 변형율을 구할 수 있다. 따라서 버링부의 초기 변형율이 다른 12개의 링크로 내구 수명 시험을 진행하여 버링부 초기 변형율과 링크의 내구 수명과의 관계를 알아보았다.

먼저, 부시 압입 시 <Fig. 16>과 같이 부시 압입력 F는 버링부의 상단 B_u 과 하단 B_b 에 응력이 분배되어 전달된다. 따라서 인장응력의 배분을 측정하기 위해 상, 하단 버링부에 스트레인 게이지를 부착하고 부시 압입 시 발생한 변형율을 계측하였다. 계측 결과, 12개 링크의 평균값으로 상단 B_u 변형율이 1895 $\mu\epsilon$, 하단 B_b 변형율이 2283 $\mu\epsilon$ 으로 나타났으며 상단 B_u 과 하단 B_b 의 약 1 : 1.2 비율로 부시 압입력이 분배됨을

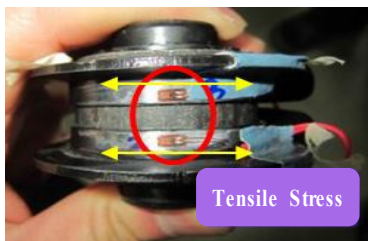


Fig. 15 Position of strain gauge on burr and tensile stress direction

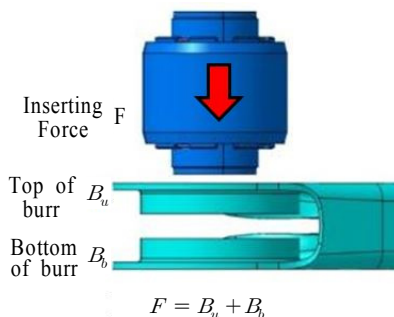


Fig. 16 Distribution of tensile stress on burr

파악하였다. 이는 <Fig. 4>와 같이 링크 하단 버링부의 초기 파단 경향과 일치한다.

이와 같은 결과를 토대로 하단 버링부를 기준으로 하여 초기 변형율과 링크의 내구 수명과의 관계를 알아보았다. 앞서 측정된 초기 변형율 값이 각각 다른 (3,600 $\mu\epsilon$ ~6,300 $\mu\epsilon$) 12개의 링크로 내구 수명을 평가하였으며, 시험 결과 <Fig. 17>과 같이 부시 압입 시 발생한 버링부 하단의 초기 변형율과 링크의 내구 수명과의 상관관계수 R 값은 0.0480으로 서로 상관성이 매우 낮음을 알 수 있다. 또한, <Fig. 17>의 표시된 부분과 같이 비슷한 초기 변형율을 갖는 링크들의 내구 수명이 큰 차이가 있는 것으로 보아, 버링부의 초기 변형율은 링크의 내구 수명을 결정하는 주된 요소로 판단하기에 어려움이 있음을 알 수 있다.

한편, 링크 몸체의 프레스 재질은 SPFH590 재질로써 최대 인장응력 $\sigma_Y = 590 MPa$, Young's Modulus $E = 205 GPa$ 의 물성치를 갖는다. 스트레인게이지의 계측을 통해 부시가 압입될 때 하단 버링부의 초기 변형율은 재료의 최대 인장변형율($\epsilon = \sigma_Y / E = 2,878 \mu\epsilon$)

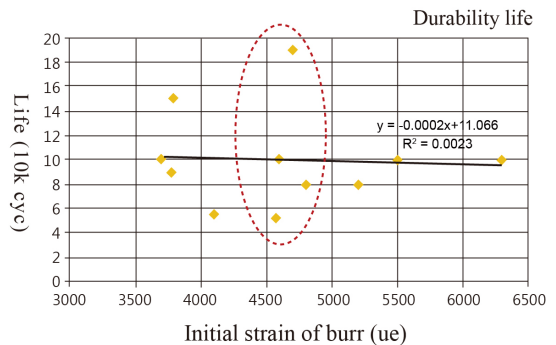


Fig. 17 Lifetime of link by initial strain at the bottom of burr(B_b)

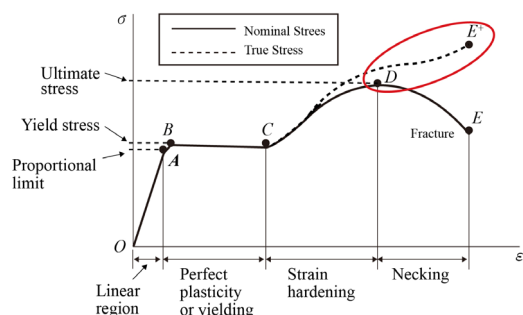


Fig. 18 Stress-strain diagram of metal

을 초과하는 인장응력이 가해지는 것을 알 수 있다. 이는 부시 압입 후 링크 몸체의 버링부가 <Fig. 18>의 표시된 부분과 같이 진응력(True Stress) 변형을 선도의 D-E' 구간에 있으며, 파단이 일어나기 전 소성 변형이 일어나는 네킹 구간의 상태라는 것을 알 수 있다.

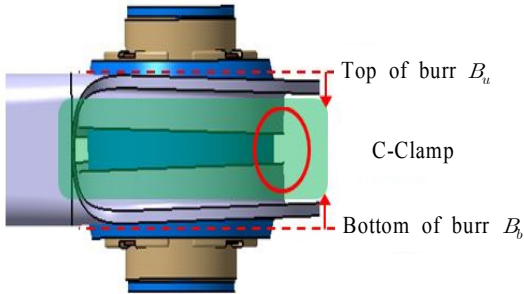


Fig. 19 Permanent deformation of burr by inserting bush

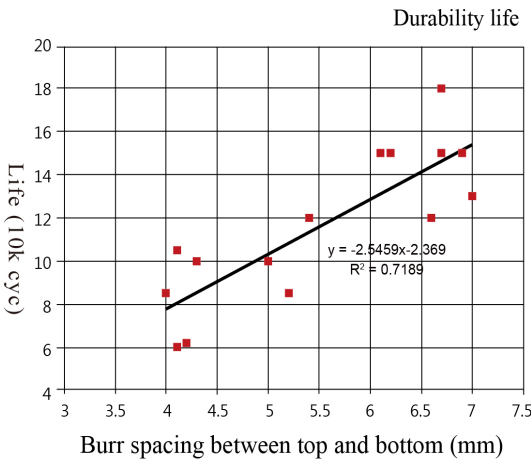


Fig. 20 Lifetime of link by burr spacing between top and bottom

3.3 압입 후 링크 변형에 의한 상-하단 버링부 간격과 내구 수명

압입 공정 시 1톤 이상의 압입력이 부시를 통해 단판 프레스 링크 몸체에 전달된다. 이 압입력은 <Fig. 19>와 같이 링크의 버링부 간격을 좁히는 영구 변형을 일으키게 된다. 이를 방지하기 위해 부시 압입 시 C형 클램프를 <Fig. 6>, <Fig. 7>과 같이 링크 버링부 사이에 삽입하고 압입한다. 따라서 C형 클램프의 높이에 따라 버링부 상-하단 간격을 조절할 수 있고, 이는 링크의 수명에 영향을 줄 수 있다. 버링부 상-하단 간격과 링크의 내구 수명의 상관성을 분석하기 위해 상-하단 간격이 각각 다른 15개의 링크로 내구 수명을 시험하였다.

먼저, <Fig. 19>와 같이 부시 압입 후 변형된 링크의 상-하단 버링부 간격을 측정하여 변형 정도를 파악하였다. 초기 설계 제원은 7mm로 명시되어 있으며 변형이 된 4mm~6.9mm까지 버링부 간격이 다른 15개의 링크로 단품 내구 평가를 수행하였다. 평가 결과, <Fig. 20>과 같이 버링부 간격이 설계 치수인 7mm에 근접할수록 링크의 내구 수명이 증가하는 것을 알 수 있으며, 버링부 간격과 내구 수명과의 상관계수 R 값은 0.8479로 높은 양의 상관성이 있음을 알 수 있다. 이를 통해 부시 압입에 의한 영구 변형으로 나타내어지는 상-하단 버링부 간격이 링크의 내구 수명을 결정하는 중요한 인자라는 것을 알 수 있다.

또한, 상-하단 버링부 간격에 따라 내구 수명이 차이를 보이는 원인은 <Fig. 21>과 같이 상-하단 버링부 간격이 좁혀지면서 버링부의 직각도가 틀어지게 되어, 링크에 작용하는 인장력이 버링부 전체 면적에 고르게 분포되지 못하고 각 버링부의 내측 모서리에 인장응력이 집중되어 크랙을 발생시키기 때문이다.

따라서 단판 프레스 압입식 링크는 부시 압입 후 받

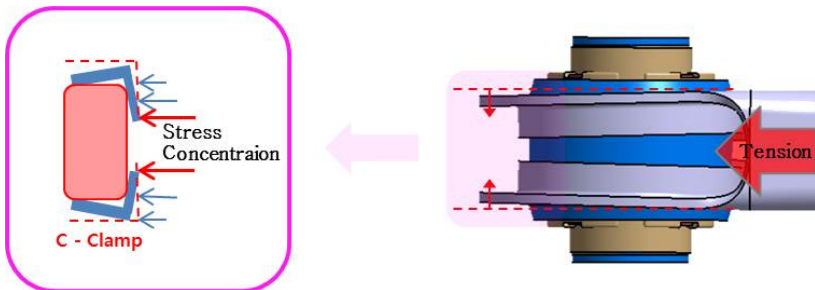


Fig. 21 Failure mechanism of link by deformation of burr area

생하는 링크 몸체의 변형을 최대한 발생시키지 않아야 하며 이를 위해 명확한 공정 관리와 규제가 필요하다.

4. 결 론

- (1) 부시 압입 공정의 부시 압입력과 링크의 내구 수명의 상관성을 판단하기 위해 단품 내구 시험을 수행하였고, 그 결과 상관성이 없음을 규명하였다.
- (2) 부시 압입 과정에서 링크 버링부의 초기 변형률과 링크의 내구 수명 또한 내구 시험 결과, 상관성이 없음을 규명하였다.
- (3) 압입 후 링크 몸체의 변형 정도를 나타내는 버링부 상-하단 간격과 링크의 내구 수명은 상관성이 높으며, 초기 설계 간격에 근접할수록 내구 수명을 확보할 수 있음을 규명하였다.

본 연구 결과를 토대로 고장력 강관으로 제작되는 단판 프레스 압입식 링크의 품질 산포 최소화 및 안정성 확보를 위해 다음과 같이 부시 압입 공정 가이드 라인을 제시할 수 있다.

- (1) 부시 압입 후 변형이 발생하는 상-하단 버링부 간격의 치수 체크 공정을 추가하여 링크의 변형을 관리한다.
- (2) 링크의 양산 중 손상 및 변형될 수 있는 C형 클램프 지그를 강도가 높은 금속으로 제작하고, 제조 중 지그의 높이 및 형상을 관리하여 상-하단 버링부의 응력집중을 분산시켜야 한다.
- (3) 부시 압입 전 링크 몸체의 상-하단 버링부의 직각도 불량 시 부시 압입에 의한 초기 평균 왜력

집중으로 링크의 초기 파단 위험이 있기 때문에 버링부의 직각도를 규제해야 한다.

- (4) 단판 프레스 압입식 링크는 부시 압입에 의한 프레스 변형 관리가 내구 수명에 중요한 인자로서 설계 도면에 관리 항목으로 명시하고 공정 관리와 규제가 필요하다.

References

- [1] Lee, I. K. *et al.* (2015). "Prediction of Shearing Life for Producing a Retainer FE Analysis". Transactions of Materials Processing. Vol. 24, No. 4, pp. 264-271.
- [2] Iman Faridmehr *et al.* (2014). "Correlation between Engineering Stress-Strain and True Stress-Strain Curve". American Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 2 No. 1, pp. 53-59.
- [3] Susmel, L., Tovo, R. and Lazzarin, P. (2005). "The mean stress effect on the high-cycle fatigue strength from a multiaxial fatigue point of view". International Journal of Fatigue, Vol. 27, pp. 928-943.
- [4] Yoshida, T., Isogai, E, Sato, K. and Hashimoto, K. (2013). "Springback Problems in Forming of High-Strength Steel Sheets and Countermeasures". Nippon Steel Technical Report, No. 103.
- [5] Bader, Q. and Kadum, E. (2014). "Mean Stress Correction Effects On the Fatigue Life Behavior of Steel Alloys by Using Stress Life Approach Theories". International Journal of Engineering & Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 50-58.