

자동차 추진축 부품의 생산성향상을 위한 설계개선

정 원[†]

대구대학교 산업시스템공학과

Redesign a Component of Automotive Propeller Shaft to Improve Productivity

Won Jung[†]

Industrial and Systems Engineering, Daegu University

In every aspect of automotive production, quality, productivity and cost are crucial matters. The purpose of this research is to improve the productivity of slip yoke for automotive propeller shaft. This paper presents how to redesign the component that currently manufactured as forged one body type. Attention was focused on not only reducing processing time but insuring durability of the component simultaneously. In Automotive, propeller shaft is the device for transferring power from engine to axle via transmission, and the slip yoke is one of the main parts in the product. Propeller shafts are subject to torsion and shear stress, they thus need to be strong enough to bear the stress.

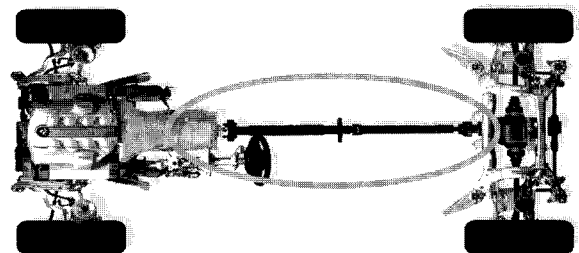
Keywords : Propeller Shaft, Productivity, Durability, Slip Yoke

1. 서 론

자동차의 추진축(Propeller Shaft)은 파워트레인시스템의 구동축으로서 엔진에서의 동력을 트랜스미션을 통해 변환시켜 차축(Axle)으로 전달시키는 동력전달 장치로서 기능상 보안부품으로 분류된다. 추진축은 엔진에서 출력되어 변속기에서 1차 감속된 동력을 최종 감속장치(차축)로 전달기능을 하며 후차축용과 터보가급기(Turbocharger)를 경유한 전차축용 및 차축 간 동력전달용으로 구분할 수 있으며, <그림 1>의 타원부분에 위치해 있다. 특히 추진축은 강한 비틀림과 고속회전을 수행하는 부품으로 오늘날 자동차 엔지니어링의 주요 관심사항인 차량의 NVH(Noise Vibration and Harchness)와 밀접한 관계가 있다. 따라서, 주행 중 정적, 동적 평형을 지속적으로 유지하기 위해서는 고유진동 및 내구성을 감안한 설계가

필요하며 제조공정별 완벽한 품질관리가 요구되는 부품이다.

본 연구의 목적은 추진축의 주요 구성부품인 슬립요크의 부품구조를 새롭게 설계 개발하여 생산성을 획기적으로 높이는 데 있다. 슬립요크는 추진축의 양쪽에 조

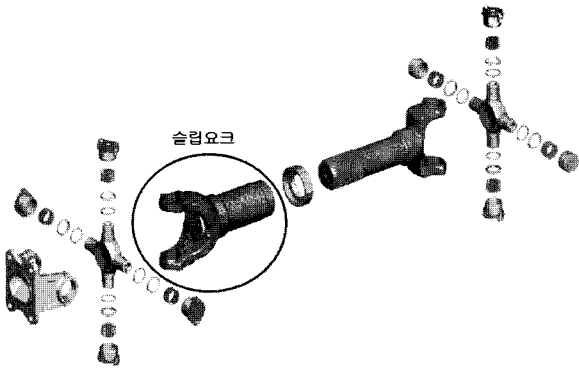


<그림 1> 자동차 추진축

논문접수일 : 2008년 02월 05일 논문수정일 : 2009년 03월 03일 게재확정일 : 2009년 03월 03일

[†] 교신저자 wjung@daegu.ac.kr

※ 본 연구는 2007학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 결과임.



<그림 2> 추진축 조립구조

립되어 있는 부품으로서 <그림 2>와 같다. 본 연구에서는 부품의 안전성 및 신뢰성은 현재의 수준으로 유지하면서 생산성을 고려하여 가공시간을 줄일 수 있는 제작방법을 연구하고 시험을 통하여 부품의 신뢰성 및 내구성을 검증할 수 있는 방안을 발견하려고 한다.

기존 슬립요크의 제작에서는 단조 공정으로 전체 형상을 만든 후 슬립구간을 먼저 드릴로 가공을 한다. 그 후 보링작업으로 한번 더 가공이 이어지고 브러치 가공으로 치형을 완성한다. 이 때 부품의 구조적인 문제로 인한 가공방식의 어려움으로 인하여 아래와 같은 문제점이 있다.

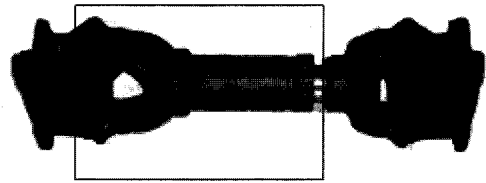
- 200mm 가량의 구간을 드릴로 가공하기 때문에 가공 시간이 너무 많이 소요된다.
- 단위시간당 생산성이 매우 낮다.
- 많은 양을 드릴하여야 함으로 드릴 작업시 떨림현상으로 인하여 정밀도가 떨어져 Spec 관리에 문제가 발생한다.
- 가공 시 소음이 많이 발생한다.
- 드릴에 의한 추가 가공방식으로 가공이 쉽지 않아 가공비로 인한 제작단가가 높다

본 연구에서는 기존의 문제점을 분석하고 설계개선을 행하고자 한다. 연구의 방향은 새로운 이론의 개발보다는 기존이론의 실용화에 초점을 두려고 한다. 관련분야로는 형상변경에 따른 구조해석과 자동차의 내구신뢰성 확인을 위한 가속수명시험[4, 5] 및 무고장시험[2, 6, 8], 기계적 고장분석[7]과 용접품질[3]에 관한 내용들이다.

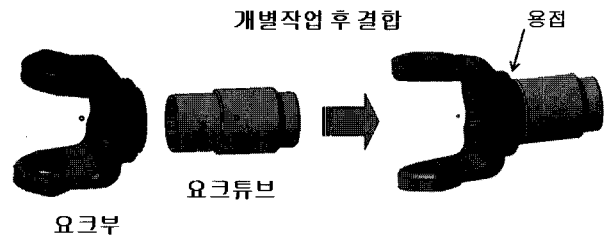
2. 설계개선 및 제작과정

기존의 제작방법에서 발생하는 여러 가지 문제점들은 <그림 3>과 같이 단조공정에 의해 요크와 요크튜브부 전체를 일체형으로 만드는데서 비롯된다. 따라서 이러

한 문제점을 해결하기 위해 설계개선 방안으로서 <그림 4>와 같이 요크와 요크튜브를 분리하여 가공한 후 용접으로 결합함으로써 가공을 원활하게 하면서도 재료를 절감할 수 있는 구조로 설계하였다. 이러한 설계방안은 가공의 원활함과 소재 절감이 가능한 획기적 방안이지만 특별히 강한 비틀림과 고속회전을 수행하는 추진축의 특성상 기존사양에서 요구되는 안전성, 신뢰성 및 내구성을 보장할 수 있어야 한다.



<그림 3> 기존의 일체형 슬립요크



<그림 4> 요크부와 슬립부의 분리제작과 결합

새로운 제작과정은 다음의 다섯 단계로 이루어진다.

- (1) 단조공법으로 요크를 가공하는 요크가공단계
- (2) 요크의 외경을 정삭하는 요크외경 정삭단계
- (3) 파이프를 브러치 가공하여 요크튜브를 가공하는 요크튜브 가공단계
- (4) 요크튜브의 외경을 선삭하고 나사산을 가공하는 요크튜브 외경 및 나사산 가공단계
- (5) 가공된 요크에 요크튜브를 삽입하여 용접으로 고정하는 용접단계.

(3)의 요크튜브 가공단계는 파이프를 3차에 걸쳐서 브러치 가공하는 것이 바람직하다. 이와 같이 새로운 제조방식은 단조하여 슬립요크를 일체로 가공하지 않고, 요크와 요크튜브로 분리하여 가공함으로써 단조시간이 줄어 전체적인 가공시간을 대폭 줄임으로써 단가를 절감할 수 있는 특징이 있다. 또한, (5)의 용접단계는

- 요크튜브 공급공정
- 요크 공급공정
- X-Y 테이블에서 요크와 요크튜브의 홈 부 클리닝공정
- 용접부 예열공정

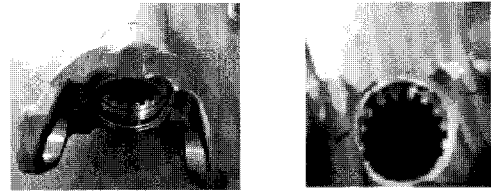
- 요크에 요크튜브를 삽입하여 용접하는 용접공정
- 용접부에 발생한 슬래그를 제거하는 클리닝공정
- 제작한 슬립요크를 검사하는 검사 테스트단계

로 이루어진다.

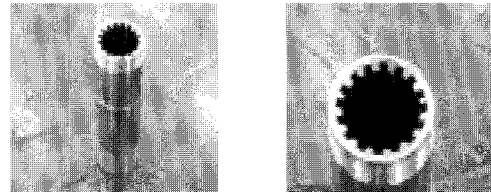
이러한 제작방법은 단조하여 슬립요크를 일체로 가공하는 방법에 비하여 제작공정의 수효를 대폭적으로 줄일 수 있으며 이를 비교하면 <표 1>과 같다.

<표 1> 종래와 새 제작방법의 공정 수 비교

공정 단계	종래	본 발명
1단계	슬립요크 단조	요크 단조
2단계	슬립요크 외경 선삭	요크 외경 정삭
3단계	조인트부 황삭	요크튜브 브러치 가공
4단계	스플라인부 가공	요크튜브 외경 선삭 및 나사산 가공
5단계	정삭	요크와 요크튜브의 용접
6단계	1~3차 브러치 가공	-
7단계	외경 정삭 및 나사산 가공	-

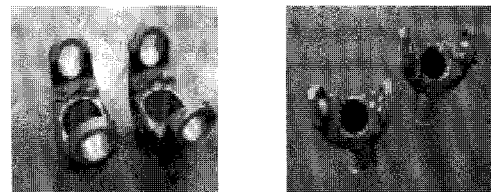


<그림 6> 삽입과정



튜브부 가공_1 튜브부 가공후_2

<그림 7> 튜브부

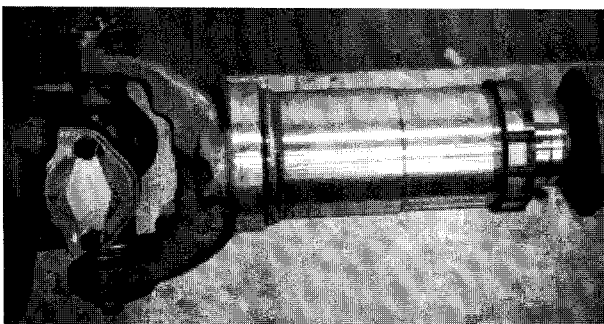


Yoke부 가공_1 Yoke부 가공_2

<그림 8> 요크부

<표 1>로부터 확인할 수 있는 바와 같이 새제품은 종래의 것에 비해 제작 공정을 2단계 줄일 수 있을 뿐만 아니라 단조단계의 단조량이 대폭 감소되어 전체적인 가공시간을 줄임으로써 제품의 단가가 저렴하게 되어 경제성이 높음을 알 수 있다.

시제품은 <그림 5>와 같이 제작되었다. 튜브부와 요크부 및 삽입과정도 <그림 6> <그림 7> 그리고, <그림 8>과 같다.



<그림 5> 시제품

3. 구조해석

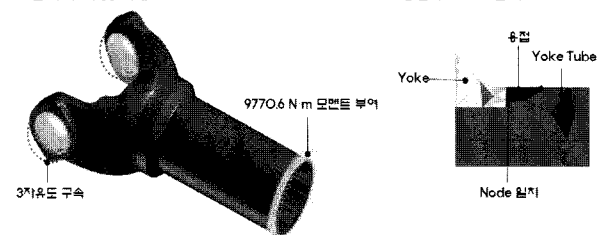
슬립요크의 유한요소 생성 후 요크튜브에 강제인가 토크를 가하여 슬립요크 에서 발생하는 변형 및 응력을

검토 슬립요크의 안전성을 판단하기 위해 MSC.Nastran을 활용한 선형 해석을 행하였다. Nastran은 가장 폭넓은 분야에서 시뮬레이션과 해석 기능을 제공하는 솔루션으로서 실제 상황에서 어떻게 설계 결과가 동작하는지 시뮬레이션할 수 있도록 한다. Nastran의 다분야 통합 시뮬레이션 기능은 엔지니어들이 상상하여 고려할 수 있는 모든 상황에서 제품의 성능을 가상 테스트함으로써 설계에 대한 신뢰를 증대시켜준다.

유한요소 생성은 요크, 요크튜브, 용접부로 3부분으로 나누어 Mesh 작업을 수행하였다. Element는 Tat4 요소를 이용하여 요크, 요크튜브 유한요소를 생성 하였으며, 용

◆ 변위 구속 및 하중조건

◆ 용접부 Node 일치

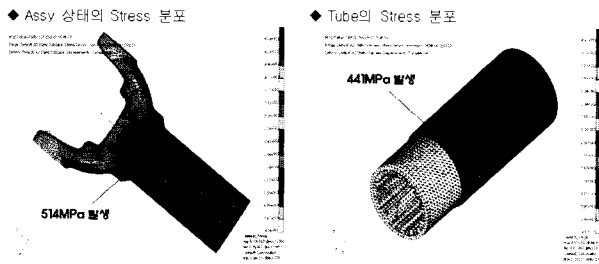


<그림 9> 경계조건

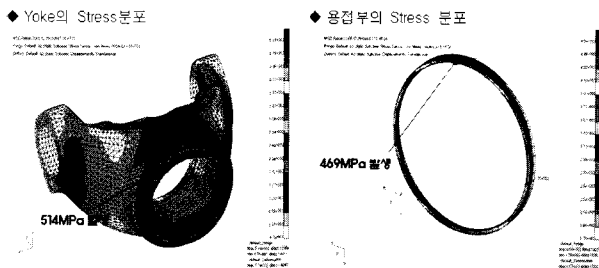
접부는 Hex8과 Wedge Element를 이용하여 유한요소를 생성하였다.

슬립요크의 강도에 대한 안전성 검토를 위해 강제 인가토크(997kgf·m)를 가하였으며, 유니버설 연결부(UX, UY, UZ)를 구속하여 경계조건을 부여하였다. 용접부의 Node를 <그림 9>와 같이 일치 시켜 해석을 수행하였다. 하중조건은 9770.6N·m와 동일하도록 Tube 외측면에 θ 방향으로 128 node에 1659.4N의 하중을 가하여 해석을 수행 하였다.

수행요크 조립품의 최대 발생응력은 약 514MPa로 요크부에서 발생한다. 튜브의 단품에서 발생하는 최대응력은 441MPa이다. <그림 10>과 <그림 11>은 부위별 응력분포를 나타낸다.



<그림 10> 조립상태와 튜브의 응력분포

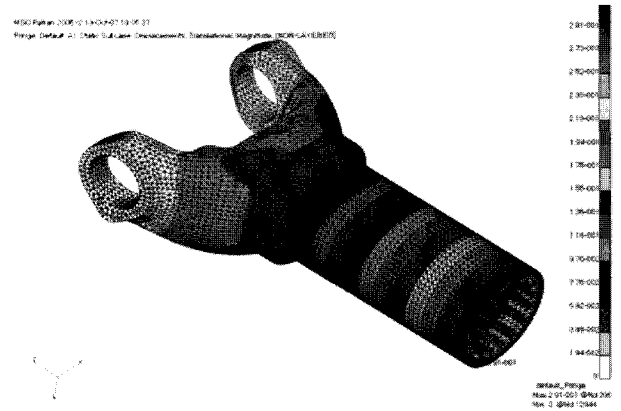


<그림 11> 요크부와 용접부의 응력분포

전체 변형량은 <그림 12>과 같이 0.3mm이다. 해석결과 최대 발생응력인 514MPa로 항복응력 530MPa보다 낮게 발생한다. 해석의 조건상 용접에 의한 열영향은 모두 동일하다는 조건으로 해석을 수행하여 실제시험과는 다소의 차이가 발생할 수 있다.

4. 신뢰성 시험

시제품을 제작하여 동력 전달 기능의 문제점이 없는 지 파악하기 위해서는 Static Torsion 및 Fatigue test를 통해 기존 성능을 낼 수 있어야 한다. 내구시험은 실제 사용 부하조건에서 제품의 성능이 스트레스와 시간의

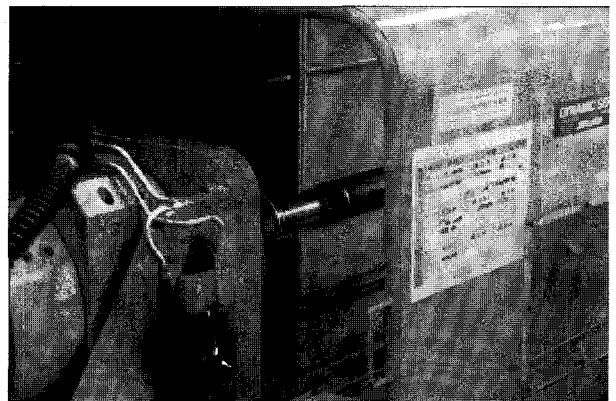


<그림 12> 변형량

경과에 따라 어떠한 영향을 받는가를 조사하는 시험으로서, 목표하는 기간 또는 작동회수 이상 내구수명을 보증하기 위하여 실시한다.

본 연구개발의 경우처럼 적은 수의 시제품을 제작하여 수명시험을 할 경우 계획된 가속수명시험시간 내에 고장이 없거나 아주 적은 수의 고장을 경험하는 것이 보통이다. 일반적으로 와이블 분포를 이용하여 수명을 평가하고 신뢰구간을 구하기 위해서는 적어도 2개의 고장데이터가 있어야 하며 그렇지 않은 경우에는 와이블 분포의 모수추정과 신뢰성계산이 부정확하게 된다[4, 5]. 무고장 데이터 분석은 Bailey[2], Nelson[6] 또는 Wang[8]의 연구결과가 있으며 본 연구에서는 와이블 분석에 관한 Nelson[5]의 연구결과를 활용하였다. Nelson이 제시한 모델은 와이블의 형상모수 β 를 알고 있다는 가정하에 적용될 수 있으며 형상모수는 과거의 경험이나 유사한 개발로부터 얻은 신뢰성데이터로부터 근사치를 유추할 수 있다.

제품의 안전성 보증을 위해서는 수명-스트레스 관계를 실험적으로 파악할 수 있도록 <그림 13>과 같이 내구수명시험을 실시하였다.



<그림 13> 내구성 시험장면

시험시간을 단축을 위해서는 가속수명시험을 실시하여야 하며, 시험데이터 분석을 위해 슬립요크의 수명과 인가되는 부하사이에 관계식을 도출한 후 부하와 수명간의 관계를 다음 순서와 같이 행하였다.

4.1 수명 분포

와이블분포의 형상모수 β 를 결정한다. B_{10} 수명, 샘플수(n), 신뢰수준(CL)과 무고장 시험 기간(t_n)을 결정한다.

4.2 형상모수 β 의 결정

실무적으로 본 제품에 대한 와이블 형상모수 β 를 결정하기 위해 다음의 세 가지 경우를 고려한다.

- 여러가지 유사제품의 시험 경험으로부터 형상모수를 평가한 적이 있는지 조사하였다. 몇 가지 사례에서 전형적인 한 개의 값을 사용하든지 혹은 몇 개의 값을 합하여 유추한다.
- 위의 경우가 불확실 할 경우 공학이론에서 추천하는 β 값을 사용한다. 예를 들면, 베어링은 보통 $\beta = 1.5$ 를 사용한다.
- 또는, 임의의 β 값을 몇 차례 다르게 사용하여 분석을 행한 후 β 값과 신뢰구간을 비교한다.

4.3 무고장 시험 기간(t_n)

$$t_n = B_{10} \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

본 시험에서는 B수명에서의 불신뢰도를 나타내는 p 값을 B_{10} 으로 하여 $p = 0.1$ 로 하였으며, β 는과거의 시험 경험으로부터 2.0으로 가정하였다.

B_{10} 수명목표는 10,000시간을 보장할 수 있도록 하고, 샘플수(n)는 3개, 신뢰수준(CL)은 80%로 정하였다. 이 경우 식 (1)로부터 22,565시간의 무고장시험이 필요함을 알 수 있다.

$$t_n = 10,000 \cdot \left[\frac{\ln(1-0.8)}{3 \ln(1-0.1)} \right]^{\frac{1}{2}} = 22,565 \text{ 시간}$$

4.4 무고장 가속 시험시간(T_n)

무고장 가속 시험 시간은 실제 사용 조건에서 요구되는 무고장 시험시간을 가속 계수로 나누어 구한다. 즉, 무고장 가속시험시간(T_n)는 무고장 시험기간(t_n)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_n = \frac{t_n}{AF} = \frac{B_{10}}{AF} \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (2)$$

여기서 AF는 가속계수(Acceleration Factor)이다. 가속 계수를 2로 할 경우, 식 (2)로부터 무고장 가속시험시간 $T_n = 11,283$ 시간 동안 가속 부하 사이클로써 제품을 시험하였을 때 고장이 발생하지 않았다고 하면, 이 제품은 $B_{10} = 10,000$ 시간까지 고장이 나지 않을 것임을 80% 신뢰할 수 있다.

4.5 무고장 가속 시험절차

무고장 가속 시험의 절차를 요약하면 다음과 같다.

- 시험할 제품의 신뢰도 목표, 즉 내구수명, 신뢰수준, 신뢰도를 확인한다.
- 시험할 제품의 실제 부하 사이클 또는 사용자 프로파일을 결정한다.
- 사용할 제품의 피로수명 지수, 고장 특성, 하중 수명 선도를 결정한다.
- 부하 사이클 또는 사용자 프로파일을 이용하여 등가 실제 부하와 등가 실제 부하 속도를 결정한다.
- 실제 사용 조건에서 무고장 시험시간을 결정한다.
- 가속 부하사이클을 설계한다.
- 가속 부하사이클의 등가 부하와 등가 부하속도를 결정한다.
- 가속 계수를 구한다.
- 무고장 가속시험기간을 구한다.

데이터 분석은 MINITAB[1]을 이용하였으며, 시작품 평가결과는 <표 2>와 같다. 생산성과 가공비용을 줄이기 위한 제품개발 과제이므로 성능은 현재 수준이상을 유지하였다.

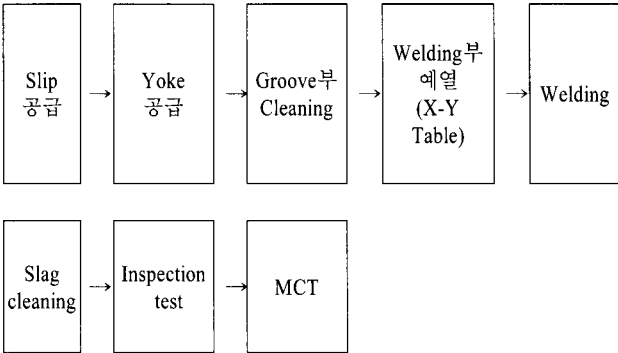
<표 2> 개발 전 후 수준 비교

평가항목	단위	개발전 수준	개발후 수준
1. Static Torsion	kgfm	1,435kgm 이상	1,468kgm
2. Fatigue	cycle	2Hz 664Kgf-m 편진40만 Cycles 이상	2Hz 666Kgf-m 편진42만 Cycles

5. 용접품질의 보증

용접공정의 구성을 위해서는 제품의 규격에 따라 공정 간의 품질기준을 세우는 등의 세부적인 기술검토가

필요하다. 본 제품의 공정은 <그림 14>와 같이 구성하였으며 <그림 15>는 용접 장면이다.



<그림 14> 용접공정



<그림 15> 용접장면

- 끼워 맞춤 시 슬립과 요크소재의 강제 압입에 따른 균열이 발생할 수 있는 현상(시험 초기에 파손된 것으로 보아 압입 시 균열 가능성 있음)
- 슬립과 요크가 결합되는 끝단 부에는 용접을 하지 않으므로 인한 회전 토크 발생 시 취약한 부분으로 비틀림 발생 파손원인 현상의 증대
- 용접 시 예열을 실시 용접을 실시하여야 하나 급랭에 따른 크랙의 발생원인 증가
- 슬립과 요크를 소둔을 실시한 후 가공하여 용접을 실시하고 Quenching을 실시한 후 Tempering 실시여부(열처리에 대한 공정의 확인 필요)
- 현재 제작 완료 된 제품의 파괴 전의 상태에서 비파괴 검사를 실시하여 크랙의 진행 상태를 확인할 필요가 있음(적은 샘플로 인한 분석의 오류발생소지가 있음)



<그림 16> 파손 부의 사진

용접품질은 용접비드의 형상과 균열, 잔류응력, 개재물, 산화막 등의 존재여부에 따른다. 따라서, 바람직한 기계적 성질을 가진 신뢰성 있는 용접부를 얻으려면 이들 요인에 대한 조절이 필수적이다.

본 연구에서는 슬립과 요크의 결합부분에 대한 용접 품질을 보증하기 위해 용접품을 해치는 주요 불연속면에 대하여 연구하였다. 연구대상으로는 기공, 슬래그 제거 물, 융합불량, 용착 부 형상 불량, 균열, 층상파열, 표면손상, 잔류응력에 따른 변형 등에 대한 연구이다[3, 7].

1차 시작품의 시험결과 슬립과 요크의 용접부위가 고유 토크를 견디지 못해 <그림 16>에 보이는 것처럼 슬립요크의 조기 파손이 있었으며 파손원인을 추정한 결과는 다음과 같다.

- 요크의 파손된 목부분은 도면상으로 R3으로 설계되었으나 근본적으로 취약한 것으로 판단 됨(R8이상)
- 원소재의 재질분석 필요(SCM440)
- 용접 시 요크부 내부에 크랙이 진행되어 쉽게 파손되는 현상

추가적인 고려사항으로는

- 현재 Slip 요크의 개발관련 Data는 어느 정도 신뢰성을 확보하고 있는가? Sample 제작시 체계적 개발절



<그림 17> 개선된 용접면

- 차에 따라 구체적이고 실용적인 데이터 분석을 통한 제품개발이 바람직함.
- 용접방법의 개발, 검사방법의 개발, 열적인 변형에 따른 압입방법개발, 열처리방법의개발 등에 대한 제품 생산 공정의 안정화 필요.

개선 후 2차 시작품의 용접면은 <그림 17>과 같다.

6. 결 론

본 연구는 새로운 개념으로 설계개선을 이루어 생산성을 향상시키고 원가를 절감하여 제품의 경쟁력을 키우는데 중요한 역할을 하였다. 본 연구개발품은 특허등록을 신청하였으며, 향후 완성차 업체로부터 내구성에 대한 객관적 검증이 이루어지면 국내외에 납품이 가능하다. 이 검증의 과정은 기계적 물성치 시험과 실차확인시험 등 납품을 위한 검증을 거쳐야 한다. 현재 해외 자동차 업체는 부품 조달 면에서 국내 업체보다는 물량과 기술면에서 우위를 점하고 있어 본 개발품이 적용되면 원가 면에서 유리한 입장이 될 것으로 예상된다.

본 연구의 성과는 다음과 같다.

- 양산에 들어가면 가공시간이 50% 이상 절감효과를 볼 수 있을 것으로 예상되므로 생산성의 획기적 개선이 기대된다.
- 단조량이 줄어들기 때문에 약 30%의 제작비용 절감이 예상된다.
- 무고장 시험 데이터에 대한 정확한 분석 방법을 적용하여 자동차 품질에서 매우 중요한 내구신뢰성 평가를 현장에서 활용할 수 있도록 하였다.
- 용접품질에 대한 문제해결 방법을 체계적으로 제시하였다.
- 저 생산비용으로 국내 매출과 해외 수출에 대한 경쟁력을 확보할 수 있다.

참고문헌

- [1] 서순근, “미니탭 신뢰성분석”, 이레테크, 281-348, 2007.
- [2] Bailey, R. T.; “Estimation from Zero-Failure Data,” *Risk Analysis*, 17(3) : 375-380, 1997.
- [3] Collins, J. A.; “Failure of Materials in Mechanical Design,” *John Wiley and Sons*, 557-568, 1993.
- [4] Nelson, W.; “Accelerated Testing,” *John Wiley and Sons Inc.*, New York, NY., 233-301, 1982.
- [5] Nelson, W.; “Applied Life Data Analysis,” *John Wiley and Sons*, 162-180, 1982.
- [6] Nelson, W.; “Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures,” *Journal of Quality Technology*, 17(3) : 140-146, 1985.
- [7] Ross, B.; “Investigating Mechanical Failures,” *Chapman and Hall*, 53-106, 1995.
- [8] Wang, C. J.; “Reliability Analysis of Data with No Failure from Fleet and Proving Ground Endurance Tests,” *SAE 920773 Society of Automotive Engineers*, 1-4, 1992.