

기계부품의 피로파괴 사례 및 방지대책

金 栽 坤

대우중공업(주) 중앙연구소 소재기술부



● 1954년생
● 용접 및 재료공학을 전공하였으며, 용접품의 응력해석(구조해석), 용접구조물의 피로시험, 용접자동화장치 개발 등에 관심이 있다.

1. 머리말

기계제품의 피로파괴 방지를 위한 무척 오랜 연구 결과에도 불구하고 현재 기계제품의 피로 파괴는 계속 보고되고 있다. 특히 현대에와서 최적 설계개념이 도입되고 경량화 추세가 진행됨에 따라 상대적으로 기계제품의 안전율이 낮아지게 되어 설계시에 예측하지 못했던 결함이 제품 내에 잠재하고 있는 경우, 피로파괴에 매우 취약하게 된다. 그러나 복잡한 제조공정을 거치는 과정에서 모든 공정을 통해 결함이 발생하지 않도록 관리하는 것이 실제적으로 매우 어렵기 때문에 관리자는 결함이 도입되기 쉬운 공정을 사전에 파악하여 그에 대한 대비를 하는 것이 피로파괴 방지의 최선책이다.

현재 피로파괴 현상은 미시적으로 파괴인성의 개념을 도입하여 균열의 전파거동이 이론적으로 잘 정리되어 있으며 특정 부위의 재료 물성을 정확히 알면 그의 피로 수명까지도 예측할 수 있는 단계까지 발전되어 있다. 그러나 실제 제품들에 있어서는 실험실에서 실험하는 재료와 같이 균일하지 않을 뿐만아니라, 응력상태도 일축(uniaxial) 상태가 아닌 다축상태가 많고 더우기 잔류응력이 중첩되어 있는 경우도 있으며, 형상인자도 수학적으로 단순히 모델링 할 수 없는 복잡한 경우가 대부분이기 때문에, 이론적인 해석이 전반적인 추세를 짐

작 하는데는 도움을 줄 수 있으나 정확한 정량 해석을 하는데는 역시 부족하다.

피로파괴가 발생한 파면은 beach mark 혹은 shell mark와 같은 특징적인 부위가 관찰 됨으로 해서 식별하기가 쉬우나, 저주기(low cycle) 피로파면은 취성파괴와 비슷하여 식별하기가 매우 곤란하다. 그리고 피로파괴 현상에 접했을때는 재료자체의 문제 뿐만 아니라 형상 및 하중조건등을 종합적으로 검토해야만 비로서 그의 원인과 방지대책을 규명할 수 있음에 유의해야 한다.

그 동안 국내에서도 학교나 전문기관을 통해 재료의 피로현상에 대한 교육이 수행된 결과 대부분의 기술자들이 재료의 피로 현상에 대한 인식을 갖고 있으나 주로 단순한 이론적인 내용에 한정되어 있는 형편이다.

본 글에 있어서는 실제 제품에서 발생하였던 피로파괴 양상의 사례를 중심으로 하여 고찰함으로써 피로파괴가 일어나기 쉬운 부위나 공정을 소개하고 그의 방지대책 수립에 도움을 주고자 함을 목적으로 하고 있다.

2. 피로파괴 사례 고찰

2.1 볼트의 피로파괴

기계부품의 체결용으로 가장 광범위하게 널리 사용되고 있는 요소부품인 볼트의 피로파괴 사례는 현장에서 흔히 접할 수 있다. 특히

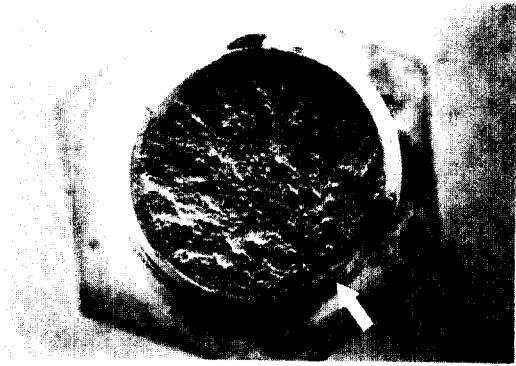


그림 1 볼트의 피로파괴

10.9T Grade 이상의 고장력 볼트가 널리 사용되면서 볼트에 인가되는 하중수준도 따라서 상승하여 볼트에 결함이 있는 경우 쉽게 피로파괴를 일으키게 된다.

그림 1에 10.9T Grade의 대형 볼트(M27×86)의 피로파괴면을 나타내었다. 그림에서 화살표가 지시하는 곳에 피로균열이 진전한 뒤 취성파괴로 발전하여 전체적인 절손에 이른 양상을 보여주고 있다.

파손된 볼트를 조사한 결과 표면에 미세균열들이 다수 발견되었다. 이러한 미세 균열의 발생원인은 표면처리 결과로 판명되었는데, 조사된 볼트는 통상적으로 고장력 볼트에서는 금지되어 있는 아연도금 공정으로 표면처리를 실시하였다. 이러한 아연도금 공정중에 발생한 수소원자가 볼트의 내부로 확산 침투한 후 응력이 인가되면 결함부 주위로 수소원자들이 모이게 되어 그 부위가 취약해지면서 균열이 발생되는데, 이런 수소 취성파괴 현상에 대해서는 이미 잘 연구가 되어 있다.

한편 볼트의 나사부위를 조사한 결과 파손된 볼트의 불완전 나사부가 그림 2에 보이는 바와 같이 매우 예리하게 가공되어 있었는데, 조사 결과 볼트의 제조공정이 일반적인 전조공정이 아닌 선반가공으로 제조되었음을 알 수 있었다. 그 결과 예리한 불완전 나사부에 응력집중이 발생되었고, 동시에 수소원자의 침투에 의

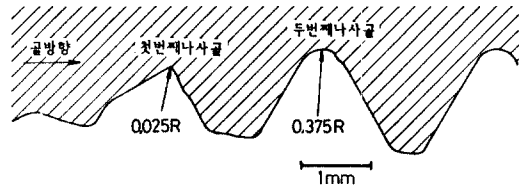


그림 2 불완전 나사부의 노치 형상

한 조직의 취성증가가 균열발생을 조장시켰으며, 그 뒤 균열성장예에 의해 파단으로 진행되었다.

이 볼트는 그 뒤 전조공정으로 변경하여 제조하며 불완전 나사부도 0.4R 이상이 되게 관리할 뿐 아니라, 표면처리도 수소 취성파괴를 일으키지 않는 흑피처리나 인산염처리로 공정을 변경시켜서 파손을 방지 하였다. 참고로 볼트의 표면에 여러가지 제약상 반드시 아연도금을 실시해야 할 경우는 아연도금 처리 후 즉시 100~200°C에서 탈수소 처리를 반드시 해야 한다.

2.2 기어의 피로파괴

기어는 기계제품의 동력을 전달하는 중요한 요소부품으로 회전도중에 각각의 이가 반복적으로 하중이 인가되어 내부나 외부에 결함이 있는 경우 피로파손이 발생되기 쉽다.

특히 기어는 내마멸성을 향상시키기 위하여 많은 경우 표면처리를 실시하는데, 침탄이나 고주파 열처리의 조직이 적절치 않을 경우는 표면에서 균열발생이 쉽고, 표면 처리층의 두께가 적절치 않을 경우는 높은 면압에 의해 발생된 헤르츠 응력 때문에 표면 직하에서 균열이 발생하여 표면층이 박리되는 피팅 혹은 스폴링 현상이 나타나는데 이 경우도 피로파괴의 일종으로 분류한다. 위와같은 현상은 계속 성장하여 결과적으로 기어의 파단으로까지 전파하기 때문에 매우 주의해야 한다.

한편 기어의 재료상에 문제가 있는 경우에서도 결함부가 반복되는 하중에 의해서 피로파괴를 일으키는 경우가 있다.



그림 3 기어의 피로파괴



그림 4 불량침탄 조직 (×200)

그림 3에 대형기어의 이가 피로파괴에 의해 파단된 경우를 보여주고 있다. 그림에서 보면 피로파괴면은 대표적인 beach mark를 보여주고 있으며 육안으로도 피로파괴의 시작점을 쉽게 구별할 수 있다. 이 피로파괴의 시작점 부위를 주사 전자현미경을 이용하여 조사한 결과 조대한 MnS가 관찰되었다. 결국 소재 내부에 존재하는 비금속개재물로부터 균열이 발

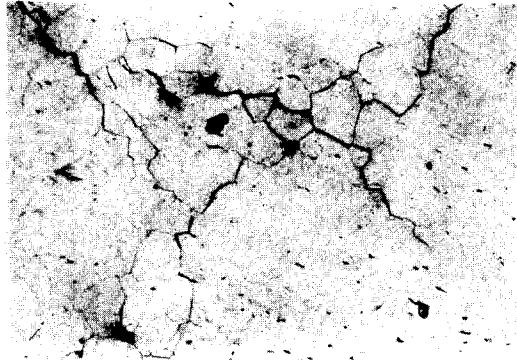


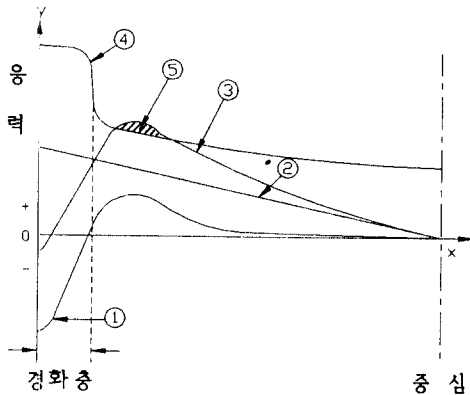
그림 5 열처리 균열

생하여 피로파괴로 진행 하였음을 알 수 있다. 한편 파손된 기어의 침탄 표면조직을 조사한 결과 그림 4와 같이 잔류 오스테나이트가 다량 함유된 불량조직이었으며 결정립 크기도 매우 조대하게 관찰되었을 뿐 아니라(ASTM # 2~3), 동시에 열처리 균열이 그림 5와 같은 양상으로 관찰되었다. 열처리 균열은 그림 5와 같이 입계균열 양상을 보이는 것이 특징적이다.

이와같은 결과로부터 사용된 소재가 불순물 함량이 많은 불량 소재였을 뿐만아니라 침탄 열처리 역시 부적절하여 조직불량 및 열처리 균열이 발생하여 동시에 파괴를 촉진하였던 것으로 판단되었다. 그와같은 결과에 의해 이 기어는 그 뒤 소재관리를 철저히 실시하여 불순물이 함유되지 않도록 하였으며, 침탄 열처리 역시 처리온도를 낮추고 2단 열처리를 실시하여 결정립의 크기를 미세하게 조절함으로 해서 파괴를 방지 하였다.

2.3 핀의 피로파괴

핀(pin)은 주로 굽힘하중을 받게 되고 표면에서 응력이 가장 크게 인가되기 때문에 피로강도 상승을 위해 고주파 표면경화 열처리를 하거나 침탄처리를 하여 표면강도를 향상시키고 동시에 표면에 높은 압축 잔류응력을 발생시켜 균열의 발생을 방지하고 피로수명을 향상



- ① 열처리 후 잔류응력
- ② 하중에 의한 응력분포
- ③ 복합응력분포(①+②)
- ④ 재료의 피로한도
- ⑤ 취약부분

그림 6 표면경화된 핀의 응력분포

시키고 있다. 그런데 이때 심부강도가 충분하지 않은 경우에는 그림 6에서 보는 바와같은 위치에서 피로강도 이하 부분이 나타나 피로균열이 내부에서 시작되어 파손에 이르는 경우가 있다.

결국 그림 6에서 보는 바와같이 부적절한 경화깊이 또는 경화부와 심부의 너무 급격한 경도의 차이에 의해서 경화층 직하에 피로강도에 취약한 부분이 출현 될 수 있다. 이와같은 현상을 방지하기 위해서는 심부의 강도(경도)를 향상시키거나, 경화부와 심부의 경도 전이를 부드럽게 한다. 즉, 소재는 소입성이 좋은 재료를 사용하여 조질처리를 하고 표면경화 장치의 선택을 신중히 하여 경도의 분포가 완만하도록 열처리 한다. 최근에 와서는 표면부의 경화층 경도치 뿐만아니라 경도분포 양상을 관리하고 있다. 그러나 그림 6에 보인 바와같이 취약부가 나타나지 않도록 잘 열처리가 된 부품이라고 그 부위에 비금속 개재물이 존재하면 그 역시 피로파괴의 기점이 될 수 있기 때문에 핀류에 있어서는 표면 부위의 비금속개재물 관리를 철저히 해야 한다.

보통 핀류의 파손은 저주기 피로파괴 양상을

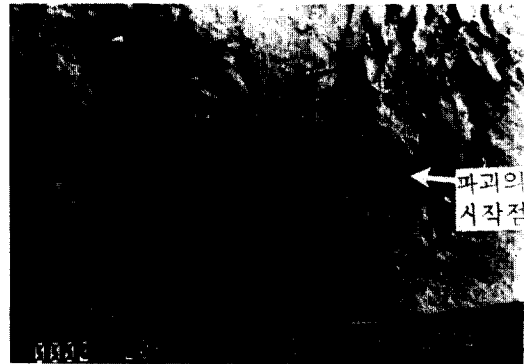


그림 7 표면 하부에서 시작된 피로균열

보이는 경우가 많으며 이 경우 피로파괴면의 대표적인 beach mark 등은 육안으로 관찰되지 않는 경우가 보통이다.

그림 7에 절손된 S50C 재질 핀($\phi 37$, 고주파 표면경화 깊이 3mm)의 파면을 나타내었는데, 화살표에서 지시하는 바와같이 파괴가 표면으로부터 약 3mm 정도 들어간 경화층과 내부의 경계부에서 시작한 것을 알 수 있다. 절손된 핀의 표면경도는 HRC 60 정도인데 비해 경화층 직하부의 경도는 HRC 19 정도로 경도의 차이가 현저하였다.

이 핀은 그 뒤 경화깊이도 5mm 이상으로 하고 내부경도도 HRC 30 이상이 얻어지는 재료로 변경하였으며, 열처리 장비도 저주파 표면 경화기로 변경하여 얻어지는 경도의 분포가 완만하도록 조치하여 피로파손을 방지하였다.

2.4 축의 피로파괴

피로파괴를 방지하는 방법으로 가장 초보적인 것이 표면에서의 노치 제거이다. 그러나 가공도중에 공구 선정의 실수 혹은 관리 부주의로 인하여 종종 노치가 유입되는 경우가 있고 그 점으로부터 피로파괴가 일어나는 경우가 있다. 특히 축류는 회전운동의 전달체로서 표면부에 큰 비틀림 응력이 인가되기 때문에 표면상태의 미세한 결함에서도 쉽게 균열이 발생하여 파괴로 전파되는 경우가 많다.

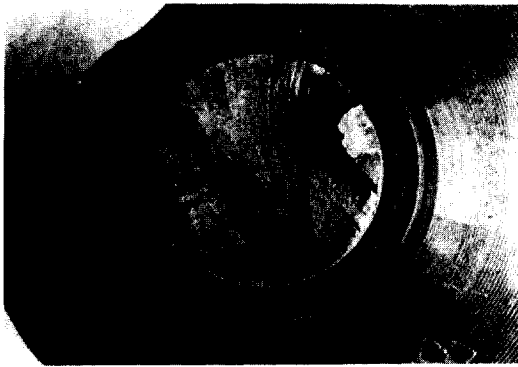


그림 8 크랭크 축의 키 홈 부위로부터 발생된 피로파괴

기계가공시 노치 발생 이외에도 재료의 비금속 개재물이 표면에 존재하는 경우에 피로강도를 현저히 저하시키는 경우가 있다. 일례로 $\Phi 150\text{mm}$ 의 대형 축의 표면부에 돌출된 1mm 이하의 비금속 개재물에 의해서 피로파괴가 발생한 경우도 있다.

그림 8에 소형 크랭크 축의 피로파괴면을 나타내었는데 키 홈 부위로부터 피로파괴가 진행된 상태를 잘 보여주고 있다. 이 키 홈은 조사 결과 도면에서 규정하고 있는 것 보다 예리하게 가공 되었을 뿐만 아니라, 키 홈 근처의 베어링 시이트에 실시하는 표면 고주파 열처리가 키 홈 부위까지 침입하여 키 홈 부위에 인장 잔류응력이 인가되면서 피로한도를 더욱 저하시킨 것으로 조사되었다.

이상과 같이 상식적으로 제품의 표면에 노치가 존재 할때는 피로강도가 저하 한다는 것을 잘 알고 있지만, 실제적으로 가공 불량으로 발생한 노치로 인해 피로파손 사례가 종종 발생하기 때문에 관리자는 노치 발생이 우려되는 부위는 주기적으로 관리하여야 한다.

2.5 용접물의 피로파괴

용접물에서는 자주 피로파괴 현상이 발생하는데 그 이유로는 용접 비이드의 toe가 노치 효과를 야기시킬 뿐만 아니라, undercut과 같

은 표면 결함이 발생하기 쉽고 기타 혼입된 비금속개재물이 모두 응력집중을 일으켜 피로균열 발생점들로 작용하게 되기 때문이다. 한편 용접부는 보통 인장 잔류응력이 중첩되어 있고 조직 또한 취화되어 있어 균열의 진전속도가 빨라 쉽게 파단이 일어나게 된다.

용접물의 피로파괴를 방지하기 위해서는 우선 응력집중부가 나타나지 않도록 표면상태를 잘 관리해야 하는데, 높은 피로강도가 필요한 경우에는 용접 후 연삭을 실시하여 용접비이드를 평평하게 가공해 주어야 한다.

그러나 용접성이 좋은 SM 강판의 경우는 큰 문제가 없지만 탄소함량이 높은 재료를 용접할때는 용접도중 재료가 열처리 되어 용접 열영향부에 취성이 큰 조직이 발생되고 경우에 따라서는 균열이 발생하기도 한다. 그림 9에 S 45 C 재질의 부품과, SS 41 강판이 용접되는 구조물에서 S 45 C 부품쪽의 열영향부에서 관찰된 균열을 나타내었다. 이 구조물은 그림과 같은 균열이 성장되어 피로파괴로 발전되어 파손되었다. 용접 열영향부의 경도를 측정한 결과 부분적으로 Hv 700 이상이 관찰 되었으며 조직은 취성이 큰 마르텐사이트 조직이었다.

일반적으로 용접부에서는 용접 열영향부의 경도가 Hv 350 이하가 되도록 관리하고 있는데 그와같은 경도를 얻기 위해서는 용접 전에 모재를 예열한다. 예열을 실시하면 용접 후 냉각속도가 느려지게 되어 비교적 연성을 갖는 조직으로 상변태되므로 취성이 방지되며 따라서 균열이 발생되지 않는다.

그림 9에 표시한 구조물은 그 뒤 S 45 C 부품을 150~200°C로 예열 함으로써 균열발생을 방지하였으며 따라서 피로파괴도 방지할 수 있었다.

한편 피복용접봉을 사용하여 용접할 경우 염기성 피복 용접봉의 사용은 특별한 주의가 필요하다. 염기성 피복재는 그의 특징상 흡습성이 있는데 습기를 함유한 용접봉을 사용하여 용접하면 수소원자가 용접도중에 용접부에 흡수되어 앞서 볼트의 피로파괴에서 설명한 수소



그림 9 용접 열영향부에 발생한 균열

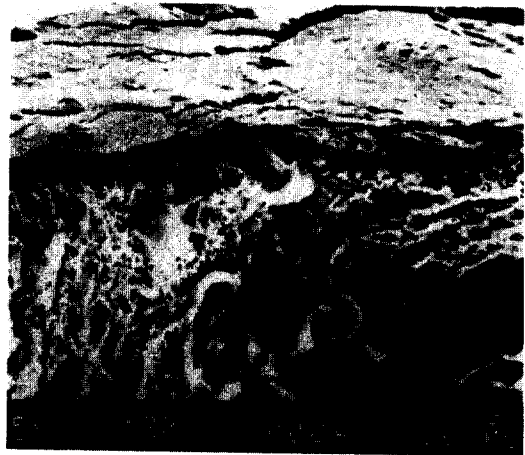


그림 10 금형표면에서 관찰된 미세균열

취성파괴가 발생한다. 그러므로 염기성 피복용 접봉은 사용전 충분히 건조시켜 습기를 방출시키고, 저장 할때도 습기가 침투하지 않게 포장하거나 오븐에 넣어서 보관하여야 한다.

2.6 금형의 피로파괴

금형의 손상은 주로 마멸에 의하지만 재료의 열처리가 적절치 않은 경우 취성파괴를 일으키는 경우도 있다. 그러나 열간금형의 경우 작업도중 계속 가열, 냉각이 반복되면서 열응력이 발생하여 피로균열을 발생하여 경우가 있다. 특히 금형의 사용온도 및 재료의 열처리 상태가 적절하지 못한 경우 재질이 취약하게 되어 미세한 균열이라도 급속히 성장하여 파괴에 이르게 된다.

그림 10에 판단된 SKD 61종 열간 단조용 금형의 주사 전자현미경 사진을 나타내었다. 그림에서 보면 파단면 주위에 미세한 균열들이 존재하고 있음을 알 수 있는데 이러한 균열들은 사용도중 발생된 반복적인 열응력에 의해서 발생되었다.

한편 파손된 금형의 조직을 조사한 결과 그림 11에 보인 것과 같이 결정입계를 따라 탄화물이 망상으로 석출하여 있는 것을 관찰 할 수 있었다. 이것은 열처리도중 냉각속도가 늦었다는 것을 의미한다. 그 결과 파괴는 취성이 큰 입계를 따라 쉽게 전파되어 단시간에 파단이

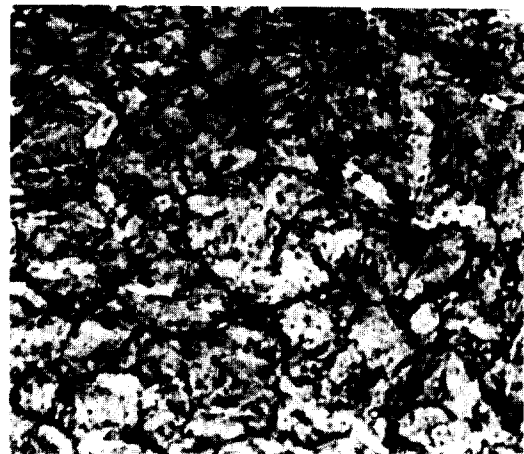


그림 11 파손된 금형의 현미경 조직 (×2000)

일어났음을 알 수 있었다. 그리고 작업상황을 조사한 결과 추천되는 금형 사용온도(약 250℃ 이상) 보다 낮은 온도에서 작업이 이루어 졌음도 밝혀 졌다.

그에 따라 이 금형은 열처리에서 망상 탄화물이 생성되지 않도록 냉각속도를 빠르게 지정 하였으며, 작업에 들어가기전 금형을 충분히 예열하여 실시한 결과 금형의 수명이 종전에 비해서 2배 이상 연장되는 효과를 거두었다.

3. 맺음말

앞서 여러가지 요소부품의 다양한 피로파괴 사례에 대하여 고찰 해 보았는데 현재 생산현장에서 자주 발생하는 문제이기 때문에 주의를 기울일 필요가 있다.

피로파괴의 발생원인을 살펴보면 다음과 같이 4가지로 구별된다.

- (1) 설계불량
- (2) 가공불량
- (3) 소재불량
- (4) 부적절한 사용

그러나 현재 기계설계시 일반적으로 형상계수 및 충격계수를 포함한 안전율을 여유있게 고려하기 때문에 피로강도가 간접적으로 설계시 반영되어 피로파괴는 주로 가공이나 원소재 불량 및 사용상의 부주의에 의한 경우가 대부분이다. 즉 기계가공 도중에 노치가 유입되어 응력집중을 발생시키거나, 규정된 표면처리 혹은 열처리가 이루어지지 못해서 재료의 피로강

도가 저하한 경우가 많으며, 소재 역시 비금속 개재물이 다량 함유되어 있거나 열처리 특성이 조악한 소재가 사용되어 요구되는 강도를 확보하지 못한 경우도 많다.

그 반면 사용자 측에서도 설계강도를 무시한 과부하를 인가하거나, 부식환경 혹은 고온에서 사용하여 피로파괴를 촉진시키는 경우도 있으므로 사용자도 설계조건을 인식하여 그 한계를 넘지 않도록 해야 한다.

피로파괴는 단순한 원인에 의한 경우가 적고 복잡한 여러 형상이 중첩되는 경우가 많기 때문에 해석하기 어려운 경우가 많다. 결국 피로파괴의 방지는 피로강도를 저하시킬 수 있는 요인들을 종합하여 설계단계에서 부터 최종 사용단계까지 지속적인 관리에 의해서만 달성될 수 있다.

끝으로 한정된 지면에 많은 사례를 소개하다 보니 각각의 사례에 대한 자세한 설명이 부족한 감이 있으나 본 글이 앞으로 기계부품들이 피로파괴의 이해 및 사전 예방에 다소나마 도움이 되기를 바란다.

會員 原稿 投稿 案内

1. 內容 : 1) 論說, 展望, 解說, 講座, 資料, 紹介, 紀行文·見學 및 參觀記, 體驗談, 隨筆, 國內外뉴스, 會員의 소리, 其他.
*採擇된 原稿는 本學會 所定의 原稿料를 드립니다.
- 2) 『特別會員』社의 研究所 紹介 및 新製品 紹介, 工場 施設 擴張, 國產化 또는 技術開發 成功事例 等
2. 其他 : 投稿 原稿의 內容, 題目 等은 自由로 하며, 수시로 접수합니다.
3. 原稿接受處 : 大韓機械學會 事務局 編輯擔當者.
서울特別市 永登浦區 汝矣島洞 13의 31(기계회관 6층)
전화 : (02)783-4571 FAX : (02) 780-1370