

충격하중에 의한 용접구조물의 강도 증가에 관한 연구

이천수*, 양영수*

A Study on the strength improvement in weldment by the impact loading

C. S. Lee* and Y. S. Yang*

Abstract

It is well known that during the oxygen cutting process residual thermal stresses are produced in weldment. The local non-uniform heating and subsequent cooling, which takes place during any welding process, causes complex thermal strains and stresses to finally lead to residual stresses exceed to the yield stress. High tensile stresses combined with applied structural load in the region near the welded joint can give rise to distortion, brittle fracture, change of the fatigue strength and stress corrosion cracking. The appropriate treatment of the welded component which reduces the peak of the welding residual stresses is believed to lower risk of the fracture during the service of the structure. In this study, the impact loading in oxygen cutting frame was applied to reduce the residual stress. After applying the impact loading, redistribution of residual stress was measured by cutting method and the effect of fatigue was tested.

Key Words : Residual stress(잔류응력), Impact loading(충격하중), Fatigue test(피로시험), Heat Affected Zone(열영향부), Hammer Peening(해머 피닝)

1. 서론

용접구조물은 용접중의 국부적인 가열에 의해 불균일한 온도분포를 갖게되며, 이러한 불균일한 온도분포로 인하여 모재에 열 응력이 발생한다. 모재가 열을 받으면 항복응력이 저하하기 때문에 발생한 열응력은 항복응력을 초과하여 소성변형을 일으키고 냉각, 수축후 최후에 재료 내부에 잔류응력을 생성시킴으로써 구조물에 피로강도

저하 등 많은 문제점을 야기시킨다. 이와 같은 현상은 용접공정에서 일반적으로 나타나는 현상으로서 많은 연구가 되어 왔다.¹⁾ 특히 고강도 강이나 후판용접에서는 열변형에 저항할 수 있는 모재의 강도가 크기 때문에 비교적 열변형이 적고 큰 잔류응력이 발생한다. 따라서 용접부에 형성된 인장 잔류응력을 감소시키기 위하여 후열처리, 기계적 잔류응력 이완법등이 공업적으로 널리 활용되고 있다.

* 전남대학교 기계공학과

기계부품, 수송기계류, 구조물등에서 일어나는 파괴는 나사, 키홈, 구멍등 그 부재의 단면이 변화하는 노치(notch)부분에서 응력집중이 발생하고 특히 노치의 존재에 따라서 얼마나 응력이 집중하는가 하는 것은 피로문제를 취급함에 있어 매우 중요하다. 이와 같은 피로강도를 증가시키는 방법으로 기존의 재료를 효과적으로 그리고 손쉽게 원하는 성능과 수명을 유지하도록 하기 위하여 여러 가지 열처리 및 표면처리 방법등이 제시되고 있다. 표면경화법에는 침탄법, 질화법, 고주파 열처리법, 샷피닝(Shot Peening) 등이 있으며, 특히 샷피닝은 피로강도 및 수명향상에 대단히 중요한 역할을 한다.¹²⁾ 이들 중에서 경제적인 측면과 피로수명향상의 관점에서 보면 샷피닝은 우수한 표면가공 방법이라 할 수 있다.

따라서 구조물의 안전성 및 내구성 그리고 경량화 측면에서 용접구조물에 발생한 인장잔류응력을 압축잔류응력으로 재분포 시키기 위한 일환으로서 샷피닝 가공공정을 통하여 구조물에 충격을 가함으로써 각각의 점에 대하여 국부적인 소성변형의 결과로 변형된 지역은 늘어나면서 주위의 구속에 의해 압축을 받게 된다. 이와 같은 압축응력층은 주기적인 응력을 받고 있는 구조물 상태에서 파괴를 예방하는데 상당히 좋은 효과를 가지고 있다. 즉 피로 파괴는 일반적으로 구조물의 자유표면으로부터 성장하고 인장응력이 작용하고 있는 지역에서 시작하기 때문이다.

샷피닝에 대한 연구는 1940년대에 자동차 및 항공기 분야에서 시작되어 실용화되기 시작하였으며, 최근에는 피로강도의 최적화라는 관점에서 재료에 가장 적합한 샷피닝 조건을 선택하려는 연구가 많이 진행되고 있다.¹³⁾ Verpoort와 Gerdes¹⁴⁾는 샷볼이 재료에 가하는 투사에너지 즉 샷볼의 질량, 속도, 투사량을 변경하여 샷피닝시 이용된 에너지에 대한 적절한 조건을 찾고자 하였으며, 피로수명에 영향을 미치는 잔류응력에 대한 연구를 통하여 이종규등¹⁵⁾은 다양한 샷피닝의 실시조건과 부재의 기계적 특성에 의하여 잔류응력 분포형태가 변화되므로 기계구조물의 설계능력 및 내구성 향상에 있어서 대단히 중요한 인입임을 보여 주었다. 고바야시등¹⁶⁾은 샷피닝에 의한 잔류응력 생성 메커니즘에 대한 연구를 통하여 샷피닝시 생성된 압축잔류응력은 샷 주위에 생성된 잔류응력의 중첩의 결과로 나타남을 보여주었으며, Al-Obaid와 Al-Basani¹⁷⁻¹⁸⁾는 단일 샷이 멤버에 접촉시 샷에 의한 소성영역의 깊이와 압입깊이 사이의 관계식을 이론적으로 제시하였다. Mori¹⁹⁻¹⁰⁾등은 샷피닝에 의해 생성된 소성변형의 거동을 계산하기 위하여 동적 강소성 유한요소법을 적용하였

고, 탄성유한요소법을 이용하여 근사적으로 잔류응력 분포를 계산하였다. Murata¹¹⁾등은 세라믹판의 잔류응력을 계산하기 위하여 탄소성 응력 해석을 사용하였으며, 최대 압축잔류응력은 압입부 바닥 아래에 생성됨을 주장하였다. Hasegawa¹²⁻¹³⁾등은 동적,정적 시험을 수행하였고 단일 샷에 의해 생성된 잔류응력분포는 동적충돌에 의한 것과 다르다는 것을 보여 주었다. 이승호¹⁴⁾등은 고강도화를 위한 샷피닝이 피로강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 샷피닝 조건을 달리하는 다단샷피닝을 적용하여 압축잔류응력 생성에 따른 피로강도와와의 관계 및 기계적성질의 변화, 경도, 표면조도에 대하여 고찰하였다. K.L. Johnson, Hills and Ashelby¹⁵⁻¹⁷⁾등은 샷 피닝을 장시간 실시할 경우 응력의 세기가 어떤 최적치를 초과하여 압축층의 증가와 더욱더 커진 인장 영역의 확장 때문에 궁극적으로 피로파괴의 원인임을 보여주었다.

지금까지의 연구는 실험 및 이론적 접근방법으로 샷피닝, 즉 충격하중시의 잔류응력 분포등에 대한 연구를 주로 수행하였다. 그러나 이미 잔류응력이 존재하는 용접부에 샷피닝이나 충격하중을 가하였을 때 나타나는 현상에 대한 연구는 미미한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 충격하중을 용접부위에 작용시켜 잔류응력의 재분포에 대한 연구를 수행하였다. 충격하중으로는 햄퍼피닝을 사용하였으며, 5톤용 트럭 프레임의 산소 절단 가공부를 시편으로 선정하였다. 시편으로 선정된 5톤용 트럭프레임은 실제 산업현장에서 사용되고 있는 것으로, 장시간 사용으로 인하여 대부분의 차량 프레임에서 균열이 발생하였다. 생성된 균열의 대처방안을 연구하기 위하여 본 연구를 수행하게되었다. 산소절단에 의해 생성된 잔류응력의 분포 형태를 실험을 통하여 파악하고, 재 분포된 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 피로시험을 실시 하였다.

2. 실험

2.1 시편의 제작

차량 프레임은 Fig. 1과 같은 형상으로 엔진 조립을 위해서는 뒷면을 산소절단법을 이용하여 절단해야 한다. 산소절단시 생성된 잔류응력에 의해 피로강도의 저하로 사용중 파단이 발생하여 심각한 문제를 야기 시키기도 한다. 본 연구에서는 실제형상과 동일재료, 동일 크기로 시편을 제작하였다. 사용재료의 기계적 성질 및 화학성분은 Table 1에 나타나 있으며, 산소절단후 햄퍼피닝을 실시 하

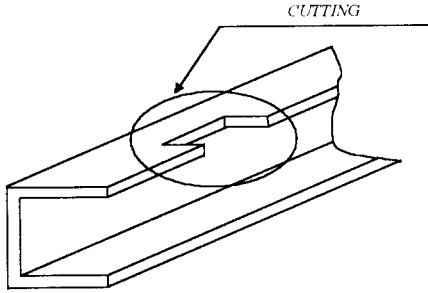


Fig. 1 Shape of Specimen

Table 1 Chemical composition and Mechanical properties of SAE1027

Chemical Composition	C	Mn	P	S	Al	Si
	0.21~0.25	1.15~1.35	0.02 ↓	0.015 ↓	0.015 ↓	0.30 ↓
Mechanical Properties	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Yield strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (BHN)	Fatigue Strength (kgf/mm ²)	Elastic Modulus (kgf/mm ²)
	87.3	77.3	12	269~331	36.9	21,000

였다. 사용된 시편의 모재는 Modified SAE 1027로서 Table 1에서 알 수 있듯이 인장강도가 87kgf/mm² 이상인 고강도이다. 햄머피닝(Hammer Peening)은 차랑상태에서 적용가능한 방법을 택하였으며, 지름이 18mm인 환봉을 절단면에 접촉시키고, 1.75kgf 중량의 햄머를 이용하여 수작업으로 실시하였다. 즉 시편전체에 걸쳐 햄머피닝을 600회 실시하였다.

2.2 잔류응력 측정

잔류응력이란 기계구조물이나 재료가 주위환경과 열적 평형상태에 있으면서 외부 하중에 의한 영향없이 내재되어 감금된 응력을 말하며, 부품의 제조, 가공과정에서 빈번히 발생한다. 이러한 잔류응력은 외부하중이 작용방향과 부호가 일치하면 해롭고, 반대이면 이로운 영향을 준다. 일반적으로 시편표면 압축잔류응력의 경우 피로수명을 증대시키므로 큰 하중을 받는 기계구조물에 슛피닝, 햄머피닝, 스트레인 피닝등을 실시하여 압축잔류응력을 주고 있다.

잔류응력을 측정하기 위한 방법으로는 홀 드릴링(Hole Drilling)법, X-선 회절법, 절단법, 취성재료 도포법, 초음파법, 자기장 측정법등이 있으며 가장 널리 사용되고 있는 방법은 절단법과 홀 드릴링법, X-선 회절법이다.

Table 2 Specification of Strain gage

구분	형식	제작회사	비고
계측기	UPM-60	HBM	-
스트레인 게이지	KFG-2-120-C1-11	KYOWA	게이지 간격 : 2mm
	KFG-1-120-D19-11 N10C2		게이지 간격 : 2mm

본 연구에서는 절단법⁽¹⁸⁾을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. 측정하고자하는 부위에 스트레인 게이지(strain gage)를 붙인 다음, 게이지 부착부와 근접한 위치까지 절단하여 이때 이완되는 변형율을 측정하였으며, 톱을 사용하여 절단해야하는 번거로움이 있으나 가장 쉽게 측정할 수 있는 장점이 있으며, 사용된 계측기 및 스트레인 게이지는 Table 2 에 나타나 있다.

2.2.1 스트레인 게이지 부착 및 절단

산소절단을 실시한 용접구조물의 표면에 생성되어 있는 잔류응력의 분포형태를 관찰하기 위하여 스트레인의 구배를 측정할 수 있는 스트립 게이지(Strip gage)를 사용하였으며, 스트레인게이지와 측정용 장비는 Table 2와 같고, 부착 위치는 Fig. 2와 같다. 잔류응력을 측정하기 위하여 절단시 톱은 일반 쇠톱을 사용하였고 절단시 발생하는 열을 충분히 발산하기 위하여 서서히 절단하였으며, 절단위치는 스트레인 게이지에서 5~10mm의 거리를 두고 절단하였다.

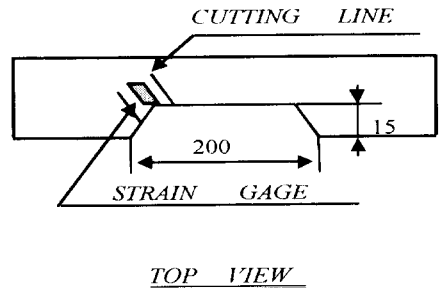


Fig. 2 Position of Strain Gage Attachment and Dimension of Oxygen Cutting Frame

2.2.2 잔류응력 측정

잔류응력의 측정은 쇠톱으로 Fig. 2와 같이 절단선을 따라 절단하면서 측정한다. 이때 게이지 부착부 주위의 응력

이 스트레인 값으로 이완되면서 응력이 해방되고 이때의 값을 UMP-60으로 측정하였다. 이때 측정된 스트레인은 다음식에 의해서 계산 하였다.

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

여기서 σ 는 잔류응력(kg/mm²), E 는 재료의 탄성계수(21,000kg/mm²) 그리고 ε 은 측정된 스트레인 값이다.

2.3 피로시험

용접구조물의 작업조건에 따른 시편의 피로한도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 모재, 산소절단, 그리고 산소절단후 해머피닝을 실시한 3종류의 피로시편을 ASTM E 466에 따라 각각 10개씩 제작하였다. 피로시험을 실시하기 위한 조건은 주파수 10Hz, 응력비(R)는 0이며, 정현파이다. 시험기기는 INSTRON 사의 10톤 피로시험기를 이용하였다.

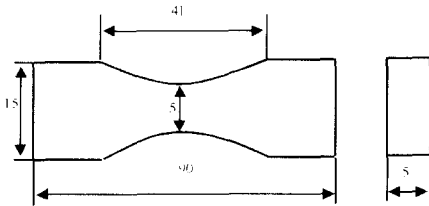


Fig. 3 Shape of Fatigue Test Specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 경도측정

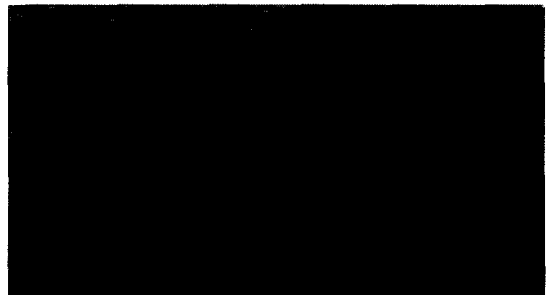
산소절단부에 대한 경도분포를 파악하기 위하여 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 0.1mm 간격으로 절단면을 기점으로 절단면에 수직방향으로 경도를 측정하였다. Fig. 4는 광학현미경을 이용하여 500배 확대한 조직사진으로서, 사진에서 보는바와 같이 (a)부는 열영향부(HAZ: Heat Affected Zone)로서 급열급냉으로 인하여 조립화된 마르텐사이트와 미소한 트루스타이트가 생성되었으며, (b)부는 혼합조직으로 조직이 균질화되어 미세한 페라이트와 펄라이트의 혼합형태를 보이다가 (c)부인 모재조직은 담금질과 뜨임을 하여 강도, 인성 및 탄성이 우수한 솔바이트 조직을 나타내고 있으며, 각각의 부위에 대한 경도는 Fig. 5에 나타나 있다. 경도 및 미세조직 사진을 통하여 산소절단시 열영향부의 크기를 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 The microstructure of oxygen cutting zone (a: surface, b:mixing, c: base metal)

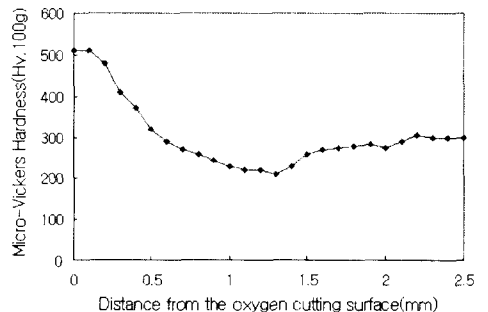


Fig. 5 Micro-Vickers Hardness

3.2 잔류응력 및 피로강도 측정

용접구조물은 용접중 국부적인 곳에 집중적으로 열이 가해짐으로서 불균일한 온도분포를 갖게되며 이로 인하여 열 응력이 발생하게 된다. 이와같이 발생된 열응력은 인장 및 압축으로 구분되어 구조물에 잔류하고 있으며, 특히 구조물 표면에 잔류된 인장응력은 구조물이 인장하중을 받고있는 경우에 치명적이다. 따라서 이를 해소하여 피로강도를 향상시킬 목적으로 해머피닝, 슛피닝 그리고 후열처리등 각종 기계적인 방법등이 이용되고 있는 것이다. 본 논문에서 수행한 산소절단 및 절단후 해머피닝을 실시한 경우에 잔류응력 재분포에 대한 측정값이 Fig. 6에 나타나 있다. 산소절단된 시편인 경우 항복응력이 가까운 최고 70kg/mm² 정도의 인장잔류응력이 관찰되었으며, 용접구조물에 대한 강도증가의 효과를 파악하기 위하여 해머피닝을 실시한 경우를 살펴보면 최고 30kg/mm² 정도의 압축 잔류응력이 표면으로 부터 9mm 정도까지 관찰 되었다.

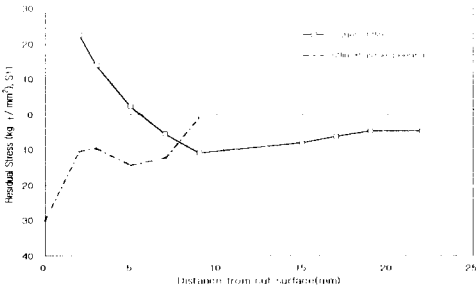


Fig. 6 Distribution of Residual Stress in Weldment

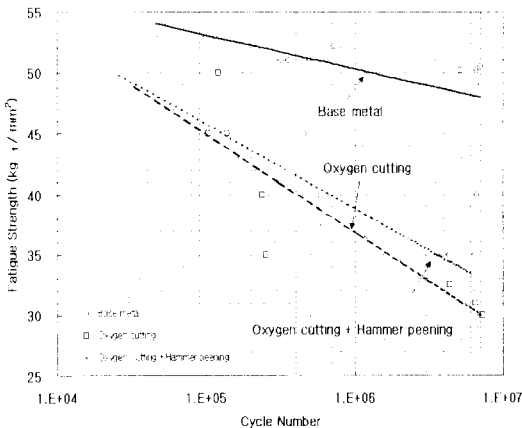
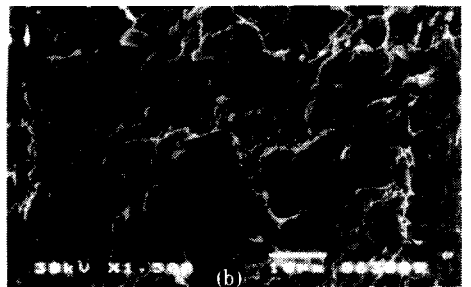
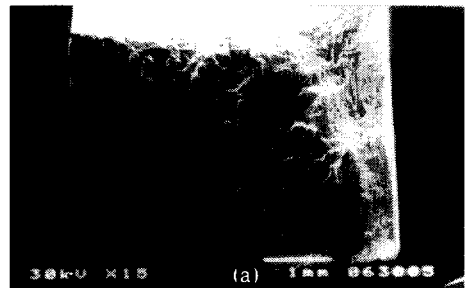


Fig. 7 The Result of Fatigue test at each Specimen

이와같이 재분포로 형성된 압축잔류응력은 구조물의 피로강도를 증가시키는데 큰 영향을 미치고 있음이 피로시험을 통하여 확인되었다. 즉 모재, 산소절단 및 산소절단 후 해머피닝을 실시한 각각의 용접구조물에 대하여 피로 시험을 실시한 결과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 산소절단 후 아무런 후열처리를 하지 않은 시편인 경우 피로한도는 31kg/mm² 정도 나타났으며, 피로강도 증가를 위하여 실시한 해머피닝된 시편인 경우 피로한도가 35kg/mm²으로 증가효과를 나타내었다. 이와같은 현상은 인장하중을 받고있는 구조물에 있어서 표면에 형성되어 있는 압축잔류응력이 초기의 크랙 생성을 지연시키고 있음을 알 수 있었다.

3.3 파면관찰

피로시험후 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 500배 확대하여 피로파면을 관찰하였다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 파면은 전반적으로 80% 정도가 피로진행에 의한 것이며, 20% 정도는 최종 급속파단 양상을 나타내었다. 보다 더 자세하게 피로파면의 진행 상태를 살펴보면, (a)부분에서 피로파면의 일반적인 현상인 발고랑 모양의 스트라이에이션(Striation)이 피로파면의 기점부터 관찰되었으며, 피로가 점차적으로 진행됨에 따라 단면의 감소로 (b),(c) 및 (d)에서 점차적으로 스트라이에이션의 간격이 증가되고 있음을 알 수 있었다. 또한 최종 파단부에서는 소성변형을 수반한 움푹 파인모양의 딥플(Dimple)이 관찰되었다.



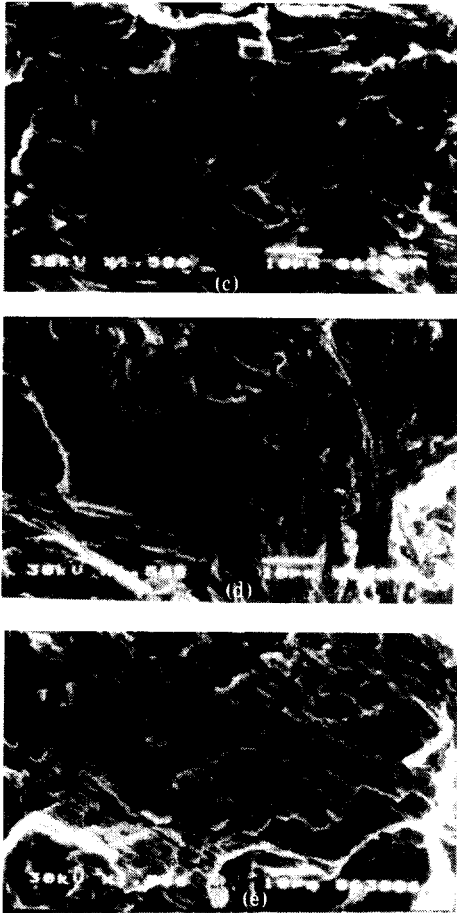


Fig.8 Photograph of SEM During the Fatigue crack growth(a:initial crack region, b,c : crack propagation region, d: final crack region, e: final region of specimen)

4. 결론

잔류응력을 측정할 결과 산소절단부를 중심으로 크게 형성된 인장잔류응력은 충격하중을 실시한 결과 표면으로부터 최대 8mm 정도까지 30kg/mm² 정도의 압축잔류응력을 얻어 구조물에 대한 피로강도의 증가효과를 나타내었다.

모재와 비교할 때 산소 절단의 피로한도는 40% 정도 낮게 측정되었으며, 용접구조물의 강도증가를 위하여 해머피닝에 의한 충격하중을 실시한 경우 피로한도가 35kg/mm²로 증가 효과를 나타내었다. 이는 표면에서 생성되어 있는 인장잔류응력을 압축으로 재분포시킴으로써

초기의 크랙생성을 지연시키는 효과에 기인된 것으로 인장응력을 받고있는 구조물에서의 강도증가를 위해서는 응력의 재분포를 위한 소성가공법이 수반되어야 함을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 지금까지 정성적으로 알려진 용접부의 충격하중에 의한 피로강도 증가를 정량적으로 알 수 있게 되었다.

후 기

본 논문은 1999년도 두뇌 한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 심용래, “유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력 변형 및 파괴해석”, 대한용접학회지제15권 제1호, 1997년 2월, pp.15~25.
- (2) Xenophon J. K., “Shot Peening Viable Method to Extending Component Life”, SAE Technical Paper Series 891932. pp. 1~8,1989.
- (3) K. Yozo, T. Shinzaburo, K.Masaki, “Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperature”, Journal of the Society of Materials Science in Japanese, Vol.45, No.1, pp. 43~47, 1996.
- (4) C. M. Verpoort, C. Gerdes, “Influence of shot peening on Material Properties of Turbine Blades”, Shot peening theory and application, IITT-International, France, pp. 11~70, 1989.
- (5) 이종규, 김정규, “피로강도 및 수명에 미치는 shot peening에 의한 잔류응력의 영향”, 대한기계학회 논문집, 제21권, 제9호, pp. 1498~1506, 1997.
- (6) M.kobayashi, T.Matsui and Y.Murakami, “Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening”, Int. J. Fatigue Vol. 20, No.5,1998, pp. 351~357.
- (7) Y.F.Al-Obaid, “A Rudimentary analysis of improving fatigue life of metal by shot-peening, Journal of applied mechanics, ASME Trans., June 1990, Vol.57, pp. 307~312.
- (8) Al-Hassani, S.T.S., “The shot peening of metals-mechanics and structures”, SAE821452, Soc.

- Automotive Engineering, PA, USA, 1982, 4513~4525.
- (9) Ken-ichiro Mori, et. "Three-Dimensional finite Element Simulation of Plastic Deformation and Residual Stress in shot-peening(Deformation by single shot)", Trans. JSME, Ser. A, 59, 1993.10, pp. 208~214.
- (10) Mori, K., Osakada, K. and Matsuoka, K., "Rigid-Plastic finite simulation of peening process with plastically deforming shot", Trans. JSME, Ser. A, 1995, 61, pp. 1337~1342.
- (11) Murata, K., Mizutani, K. and Tanaka, Y., "Residual stress in multi-indented surface layer of ceramics-effects of hardness and X-ray penetration depth on residual stress". JSME, 1994, 43, pp. 772~778.
- (12) Hasegawa, N., Watanabe, Y. and Fukuyama, K., "Creation of residual stress by high speed collision of a steel ball, Symposium 'Recent Research of Shot Peening' JSSP, Society of Shot Peening Technology of Japan, 1996, pp. 1~7.
- (13) Yoshihiro Watanabe, et. "Simulation of Residual stress distribution on shot peening", J.Soc.Mat. Sci, Vol. 44, No. 496, 1995, pp. 110~115.
- (14) 이승호, 김희승, 정성균, "-shot피닝에 의한 재료의 특성에 관한 연구", 한국공작기계학회 제7권 제2호, 1998. 4, pp. 15~22.
- (15) Johnson, K. L, Deformation of a plastic wedge by a rigid flat die under the action of a tangential force", J. Mech. Phys. Solids. 16, 1968, pp. 395~402.
- (16) Johnson, K.L, "The correlation of indentation experiments, J.Mech. Phys. Solids 1, 1970, 115.
- (17) Hills, D.A. and D.W. Ashelby, "The influence of residual stress on contact load bearing capacity", Wear 65(2), 1982, pp. 221~240.
- (18) Tebedge, N., Alpsten, G., and Tall, L., "Residual Stress Measurement by Sectioning Method", Experimental Mechanics, 1973, Feb., pp. 88~96.