

냉간체결방법을 이용한 대형 주철 구조물의 피로손상수리방법에 대한 연구

이성룡^{1*}, 이동준², 조석수³

¹강원대학교 재료융합공학부 재료금속공학전공, ²강원대학교 산업과학대학원 재료금속공학과,
³강원대학교 기계시스템공학부 기계설계공학전공

A Study on the Repair of Fatigue Damage at Large Cast Iron structure using Cold Joint Method

Sung-Riong Lee^{1*}, Dong Jun Lee², Seok Swoo Cho³

¹Division of Materials and engineering, Kangwon National University

²Division of Materials and engineering, Graduate School of Industry & Science, Kangwon National University

³Division of Mechanical Design Engineering, Kangwon National University

요 약 대형 주철 구조물은 선박이나 화학 플랜트등에서 케이싱이나 대형 파이프등으로 사용되고 있다. 그러나 대형 케이싱이나 파이프에서 발생하는 파괴는 대부분 해당 재료의 항복강도아래에서 발생된다. 대형 주철 구조물의 피로 파손은 설계 제한조건과 낮은 재료 강도 신뢰성등으로 인하여 발생되고 있다. 파손된 소형 주철 구조물은 시장에서 판매되는 주철 용접봉으로 보수가 가능하다. 그러나 파손된 대형 주철 구조물이 보수 용접으로 보수되려면 구조물 전체가 균일하게 가열되어 냉각되어야 하나 현장에서는 그와 같은 가열장치를 설치하는 것이 불가능한 장소가 많다. 따라서 현재에도 선박과 플랜트 현장등에서는 파괴된 주철 구조물을 수리의 간편성으로 인하여 냉간 용접만하여 재사용하고 있고 이로 인한 피로 파괴가 재발생 되어져 파괴로 인한 손실 비용이 과대하게 발생하고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 파손된 대형 주철 구조물을 균열보수나사를 이용하여 파손된 부분을 기계적으로 결합하는 방법을 제안하여 피로 파괴된 대형 주철 구조물 보수 방법을 제안하였다. 균열보수나사로 보수한 GC 300의 노치 시험편을 인장시험한 결과 8.2 MPa정도의 인장 강도를 가지고 있어 GC 300으로 제작한 대형 열교환기나 가열기의 설계응력이 3.5 MPa이하인 것을 고려하면 안전율이 2.3이상이 되어져 균열보수나사를 이용하여 대형 주철 구조물 균열을 보수하는 방법이 공학적으로 매우 유용하다.

Abstract Large cast iron structures are used in casings and pipes in ships and chemical plants. Broken parts in the casings and pipes can result in failures even when stresses are below the yield strength of the part's materials. Fatigue failure of a large cast iron structure is inevitable due to the design constraints and low reliability of the material strength. A small structure can be repaired by welding, but a large structure cannot because it cannot be preheated slowly and uniformly. This study shows that a large structure can be repaired by a cold joint method using a crack repair screw. Large cast iron structures were manufactured by GC 300, and their design stress is below 3.5 MPa. The tensile strength on notched specimens repaired by crack repair screws was 8.2 MPa. Therefore, the safety factors of structures repaired by crack repair screws have a value above 2.3 and are considered to be high values.

Keywords : Large Cast Iron Structure, Fatigue Damage, Crack Repair Screw, Tensile Strength Test, Safety Factor.

본 논문은 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음. (관리번호-620170042)

*Corresponding Author : Sung-Riong Lee(Kangwon National Univ.)

email : sr0915@kangwon.ac.kr

Received July 2, 2019

Revised August, 28 2019

Accepted October 4, 2019

Published October 31, 2019

1. 서론

대형 주철 구조물은 대형 선박과 플랜트등의 케이싱이나 파이프 등으로 사용되고 있다. 대형 선박과 플랜트 등은 각 부품과 시스템에 대한 성능을 각 설계 규격과 해석을 이용하여 파악한 뒤 파이프리트 플랜트 시험 장치를 이용하여 확인한다. 따라서 모든 부품에 대한 장기 내구성을 확보하는 것은 어렵고 특히, 부품 재료의 불확실성이 높은 부품의 경우 내구성에 있어 심각한 문제를 가지는 경우가 많다. 특히, 대형 주철 케이싱의 경우 부품 재료가 주조성이 좋은 회주철을 이용하여 제작하고 있어 해당 부품의 파손사고는 지속적으로 발생하고 있다[1-3]. 일반적으로 정지형 대형 구조물이 피로 파손되는 경우 해당 파손 부분을 용접으로 보수하게 된다. 그러나 대형 주철 구조물의 경우 해당 부품 전체를 300-400 ℃ 정도로 예열하고 가열과 냉각시의 승온 및 냉각속도를 55 ℃/hr 이하로 설정함으로써 용접부의 인장잔류응력에 의한 균열 발생을 방지할 수 있다. 그러나 선박과 플랜트 등에 설치된 대형 주철 구조물을 분해하여 공장으로 이동하여 공장 용접을 하여야 하나 그것을 수행하는 것은 선박 운항과 플랜트 운전에서 거의 불가능한 일이다[2]. 한편, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 주철보수용접부에 숏 피닝(Shot peening)을 수행하여 용접잔류응력을 완화하는 방법을 제안하고 있다. 그러나 이러한 방법은 주물 용접 구조물의 크기가 숏 피닝 공정을 수행할 수 있는 중소형 주물 용접 구조물에 대하여 적용할 수 있으나 대형 주물 용접 구조물에는 적용할 수 없다[3].

따라서 현재에도 선박과 플랜트 현장에서는 파괴된 주철 구조물을 수리의 간편성으로 인하여 냉간 용접하여 재사용하고 있고 이로 인한 피로 파괴가 재발생 되어져 파괴로 인한 손실 비용이 과대하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 파손된 대형 주철 구조물을 균열보수나사를 이용하여 파손된 부분을 기계적으로 결합하는 냉간적 체결방법을 제안하여 피로 파괴된 대형

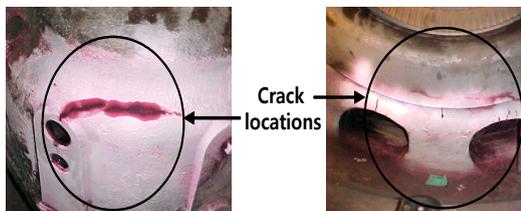


Fig.1. Failure case of large-scale cast iron casing

주철 구조물 보수 방법을 제안하였다.

2. 대형 주철 구조물의 파손 사례와 균열 보수 방법

2.1 대형 주철 케이싱의 파손 사례

Fig. 1은 국내 발전소에서 파손이 발생한 대형 가이드 베어링 하우징과 증고압 터빈 하부 케이싱의 피로균열 사례이다. 균열은 피검사체 표면의 불연속부에 염료를 함유하는 침투액을 표면장력 작용으로 침투시킨 다음 표면의 침투액을 닦아내고, 현상액을 발라서 결합부에 남아있는 염료 침투액이 표면에 나타나게 하는 염료침투탐상시험(Visible Dye penetrant Testing method)을 이용하여 검출하였다[4]. 그림에서 균열 발생 영역의 벌어진 틈 사이로 붉은 색 염료 침투액이 들어갔기 때문에 붉은 색을 띠는 영역이 균열발생과 전파가 발생한 영역이다.

2.1 균열 보수 방법의 이론적 배경

Fig. 2는 균열보수나사에 의한 균열성장억제력의 생성 기구를 나타낸 것이다. 균열보수나사머리에 임팩트 드릴링 머신 토크 T가 부하되면 균열이 발생한 구조물이 지점이 되면서 균열보수나사의 나사면과 나사 머리 자리면 사이의 영역에서 균열보수나사축력이 발생하게 된다. 이러한 균열보수나사축력과 균열보수나사의 나사면사이에서 발생하는 균열성장직각방향의 마찰계수에 의하여 균열성장억제력 F_a (Crack growth arresting force)이 발생되며 균열성장억제력 F_a 가 균열성장력 F_d (Crack growth driving force)보다 크면 균열성장은 억제된다. 이상의 관계를 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

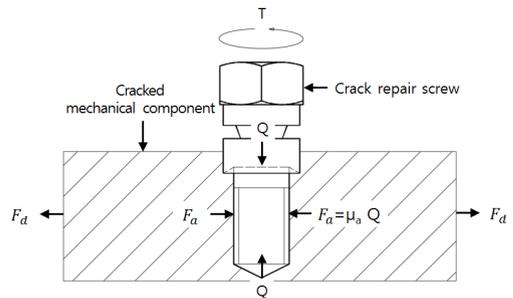


Fig. 2. Mechanism of crack growth arresting force

$$F_d \ll F_a = \mu_a Q \quad (1)$$

단, μ_a : 균열성장억제방향으로의 나사면과 나사 머리 자리면에서의 마찰계수, Q : 나사 축력

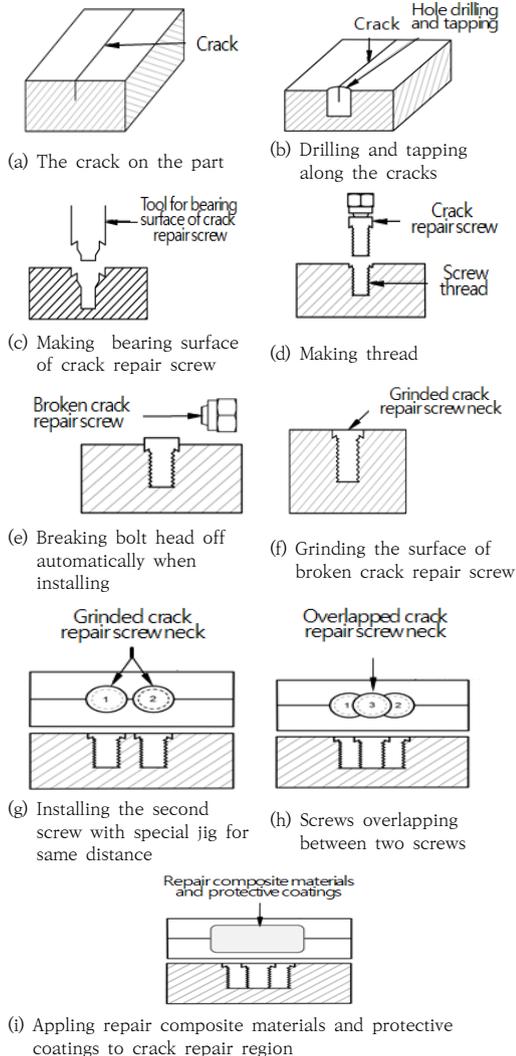


Fig. 3. Crack repair method using cold mechanical joining method

Fig. 3은 균열보수나사를 이용하여 파손된 구조물의 균열을 보수하는 절차를 나타낸 것이다. 균열보수나사가 M8×1.25의 미터보통나사이므로 균열 발생 영역에 균열 보수나사를 설치하기 위한 나사 구멍은 KS B ISO 2306[5]에 따라 나사의 호칭 지름에서 피치를 뺀 값으로 결정하였으며 그 값은 직경 6.8 mm이다. 본 연구에서도 균열보수나사의 홀 드릴링 구멍으로 6.8 mm를 결정하

였다. 그리고 M8×1.25의 스파이럴 탭(Spiral tap)을 이용하여 균열보수나사의 나사면을 생성시켰다. 육각소켓 렌치(Hexagonal socket wrench)를 이용하여 균열보수나사머리를 회전시키면 균열보수나사의 생크 부분에 있는 나사머리제거노치 영역이 균열보수나사에서 파괴되어 분리된다. 균열보수나사의 파단면을 그라인더를 이용하여 표면을 평평하게 한다. 이러한 작업을 균열발생영역 전체에 걸쳐서 수행하며 균열보수나사는 중첩시킨다. 균열발생영역에 균열보수나사를 전체적으로 다 설치한 뒤 균열보수나사 영역을 보수용 금속 분말과 액상 수지로 육성 및 코팅하여 균열보수영역을 기밀 및 수밀시킨다. 이러한 작업을 통하여 케이싱등의 내부 유체를 밀봉시킴으로써 파손된 대형 기계 구조물의 원래 기능을 발휘하도록 하여 일시적 기능 저하 및 불능상태를 복구시킨다.

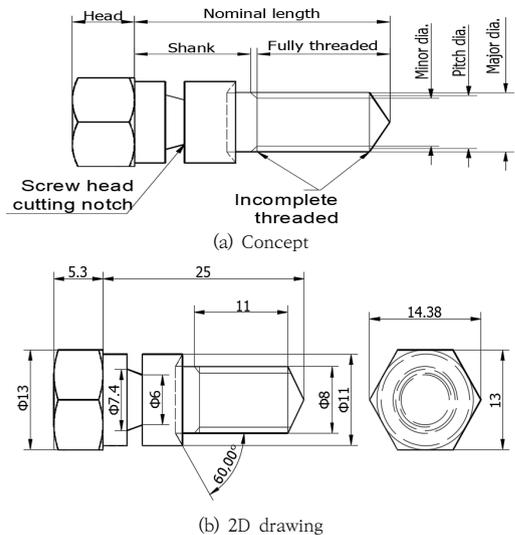


Fig. 4. Concept and 2D drawing of crack repair screw

Fig. 4는 균열보수나사의 전체적인 개념도와 2D 도면을 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)에서 나사는 나사부와 비나사부로 구성되며 비나사부는 나사 머리와 생크 부분으로 나누어진다. 나사 생크 부에 나사 머리를 임팩트 드릴링 머신으로 신속 정확하게 제거하기 위한 나사 머리 제거 노치(Notch for the removal of screw head)를 만들어 넣었다. 또한, 나사 머리 자리면이 균열발생영역에 정확하게 안착되어 높은 축력으로 인한 마찰력을 형성시키기 위하여 나사 자리면 하부에 직각 삼각형 단면의 노치를 원주 방향으로 만들었다. 그리고 균열보수나사의 외형과 치수 및 재료는 KS B 1002[6]의 육각 볼트 규격과

KS B 0201[7]의 미터보통나사 규격 및 KS B 02338[8] 강제 볼트 작은 나사의 기계적 성질을 기초로 설계 및 제작하였다.

Fig. 5는 균열보수나사를 Fig. 4의 균열보수나사를 이용한 균열보수공정 중 균열보수나사를 균열발생영역에서 중첩시켜 전체 균열발생영역을 보수하는 것을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용하는 균열보수나사는 호칭지름이 8 mm이고 균열보수나사의 중첩율을 균열보수나사 호칭지름에 대한 중첩 영역의 반경 비로 나타내면 균열보수나사의 중첩율은 23.75 %가 된다.

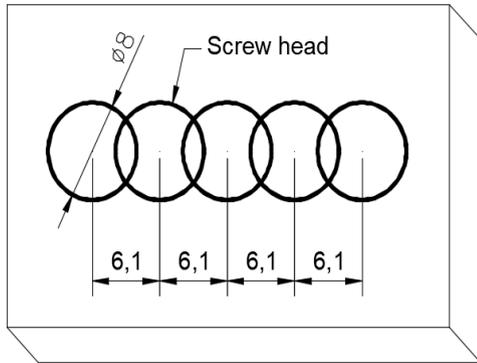


Fig. 5. Overlapping method of crack repair screws

3. 재료 및 실험방법

3.1 재료

본 연구에서는 균열이 발생된 부품 재료로 KS D 4301[9]에서 규정하고 있는 GC 300를 선정하기로 한다. GC 300은 편상 흑연을 포함하는 회주철로서 구조성이 좋아 선박이나 발전소 설비등에서 형상이 복잡한 저하중용 케이싱등으로 사용되며 피로나 응력부식균열이 자주 발생하는 것으로 보고되고 있다.

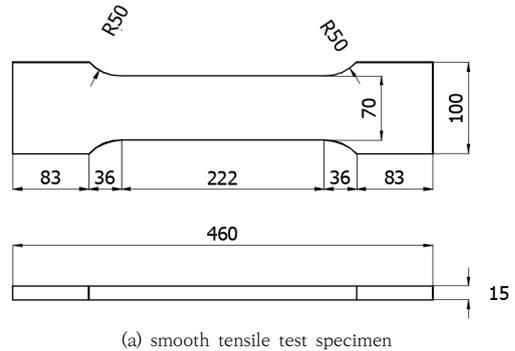
KS B 1002[6]의 육각 볼트 규격에서는 나사 재료를 강재, 스테인리스 강재, 비철금속재를 제안하고 있으며 본 연구에서 개발하는 균열보수나사 재료는 KS B 0233[8] 강제 볼트 작은 나사의 기계적 성질을 기초로 선택하였으며 부품 등급 A를 적용한 결과 강도 구분이 8.8이다. M8×1.25 미터보통나사에서 강도 구분 8.8은 나사의 유효 단면적이 36.6 mm²이고 최소인장하중이 29,200 N이상인 것을 요구하고 있어 M8×1.25 미터보통나사의 최소인장강도는 800 MPa이상을 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대형 주철 열교환기와 파이프

및 케이싱등의 균열보수를 수행하기 위한 균열보수나사 재료로서 이상의 나사 강도 구분 8.8을 만족시키는 KS D 3567[10]에 규정된 황 및 황 복합 쾌삭강(Free cutting carbon steel) SUM 43강을 이용하기로 한다.

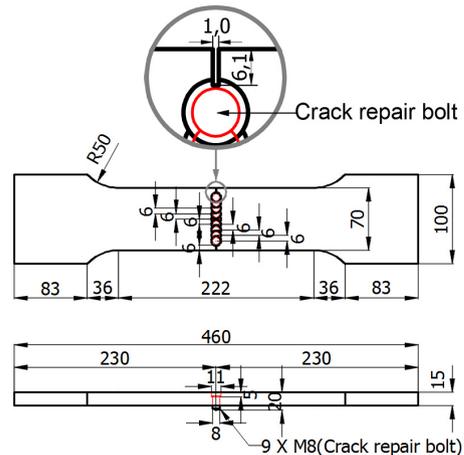
3.2 인장강도시험

균열보수단위체의 균열성장억제력을 평가하기 위하여 본 연구에서는 직선 인공 균열을 가진 균열재를 균열보수나사로 보수한 균열보수재에 대하여 인장강도시험을 수행한다. 인장강도시험에 사용하는 인장시험편은 크게 재료와 균열보수단위체 인장시험편으로 나눌 수 있으며 전자는 균열이 없는 무노치 평활 인장시험편이고 후자는 완전 이등분된 균열재를 균열보수나사로 균열 보수한 균열 보수 인장시험편을 나타낸다.

Fig. 6은 균열재에 설치된 균열보수나사에 의하여 균열성장억제력의 크기를 상대적으로 평가하기 위하여 균열이 존재하지 않는 무노치 평활 인장 시험편과 균열재



(a) smooth tensile test specimen



(b) Deep-notched tensile test specimen repaired by 9 screws

Fig. 6. Tensile test specimen repaired by crack repair screws

에 균열보수나사를 9개를 설치하여 균열을 보수한 균열 보수 인장시험편의 형상과 치수를 각각 나타낸 것이다. 균열보수 인장 시험편은 학술적으로는 깊은 노치 인장 시험편을 균열보수나사로 보수한 인장 시험편에 해당된다.

평활 시험편은 KS B 0801[11]의 14B와 균열보수나사(M8×1.25)의 나사부 길이를 고려하여 시험편 두께는 15 mm로 선정하였으며 균열보수나사의 나사산이 시험편에 9개 정도 접촉하게 되어져 안정적인 균열진전억제력을 발휘하도록 하였다. 또한, 평활 시험편의 평행부 폭은 만능재료시험기의 그립 폭이 100 mm이고 시험편 평행부 곡률 반경이 15 mm인 것을 고려하면 70 mm가 된다. 평활 시험편 평행부와 표점거리는 시험편 단면적 15×70(mm×mm)와 KS B 0801 14B의 평행부와 표점거리 계산식을 이용하면 각각 183 mm와 232 mm이다. 본 연구에서 사용하는 평활 시험편은 이상의 치수를 적용하였으며 Fig. 6에 그 결과를 나타내었다.

깊은 노치 인장 시험편은 인공 균열을 모사하기 위하여 와이어 커팅 머신을 이용하여 평활 시험편의 중앙 부분에 폭 1 mm와 길이 69 mm의 노치를 가공하였으며 그 결과 평활 시험편 폭이 70 mm인 것을 고려하면 깊은 노치 시험편의 좌측과 우측 끝단에 각각 0.5 mm씩 미절단 부분이 남게 된다. 이것은 균열보수나사를 깊은 노치 시험편에 설치하기 위한 폐쇄된 균열 전파 영역을 조성하기 위한 것이다. 만약, 균열보수나사가 열린 균열 전파

영역에 있으면 균열보수나사가 시험편으로부터 탈락될 확률이 높아 실제 균열 보수에 관한 역학적 환경을 조성할 수 없다. 균열 보수 깊은 노치 인장 시험편은 깊은 노치 시험편 폭 1 mm와 길이 69 mm 노치에 본 연구에서 제안한 균열보수나사를 설치한 균열 보수 인장시험편이다.



Fig. 7. Tensile test of deep-notched test specimen repaired by screws

Fig. 7은 최대인장하중용량 490 kN인 만능재료시험(Samhan Tech., SHUD-50)를 이용하여 크로스헤드 속도 0.5mm/min의 부하속도로 인장시험을 1개의 균열보

Table 1. Mechanical properties of GC 300 and SUM 43

Item	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile Yielding strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Hardness (HB)	Elongation (%)
Material							
Specimen (GC 300)	7.700	80	0.21	202	286	194	1.2
Crack repair screw (SUM 43)	7.700	200	0.3	550	880	90	25

Table 2. Tensile test results of the specimens with and without notch

Kind of tensile test specimen	Nominal section dimension (mm×mm)	Load (N)	Nominal tensile strength (MPa)	Average nominal strength (MPa)
smooth tensile test specimen	70×15	302,400	288	286
	70×15	298,200	284	
Deep-notched tensile test specimen repaired by 9 screws	56.04×15	5,800	6.9	8.2
	56.39×15	6,641	7.9	
	56.39×15	6,977	8.3	
	56.39×15	7,313	8.7	
	56.39×15	7,902	9.4	

수나사로 보수한 균열보수 인장시험편에 대하여 수행하는 것을 나타낸 것이다. 각 시험조건에 대한 인장 시험 결과를 응력-변형률 선도로써 구하였고 이것을 이용하여 균열보수나사의 하중 부담 능력을 평가한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 재료에 대한 인장강도시험

Table 1은 Fig. 6과 Fig. 7의 인장시험편과 만능재료 시험기를 이용하여 GC 300과 SUM 43의 인장과 경도시험 결과를 나타낸 것이다. Table 2에서 인장강도는 균열재 재료인 GC 300과 균열보수나사재료인 SUM 43의 경우 각각 286 MPa, 880 MPa을 보이고 있어 균열보수나사 재료가 균열재 재료에 대하여 3배 이상의 강도를 가지고 있어 균열보수재에 대한 인장시험시 균열보수나사가 파괴될 경우는 없을 것으로 보인다.

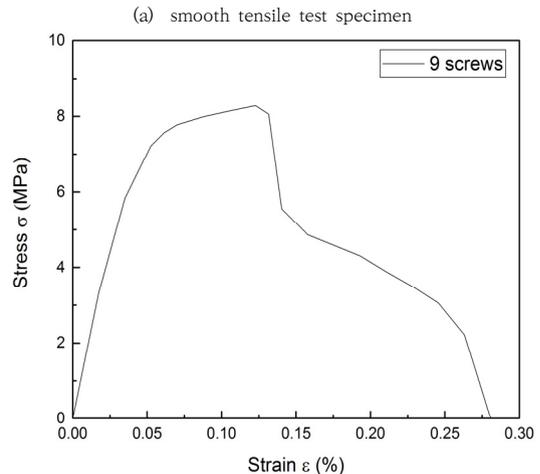
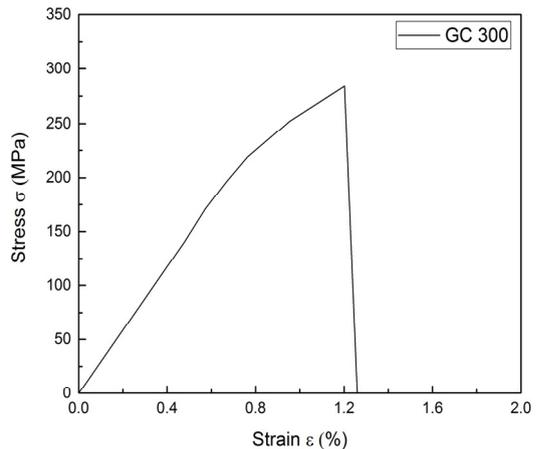
4.2 균열보수단위체 대한 인장강도시험

Table 2는 Fig. 6의 GC 300으로 만든 인장시험편에 대한 인장시험결과를 나타낸 것이고 이중 대표적인 각 시험 결과에 대한 응력-변형률 선도를 Fig. 8에 나타내었다. GC 300 평활 인장 시험편은 인장강도가 286 MPa을 나타내고 있으며 균열보수나사 9개로 균열을 보수한 깊은 노치 시험편은 인장강도가 8.2 MPa로 나타나고 있다. 따라서 균열을 보수한 깊은 노치 시험편의 인장강도는 평활 시험편 인장강도에 대하여 2.9 % 정도로서 매우 적은 인장강도 값을 가지고 있다.

KCS 57 30 35의 국가건설기준의 상수도 수압시험 및 수압검사 규격에 상수도관의 수압시험은 0.5 MPa로 지정되어져 있고 KS D 4311의 외경 2000 mm이상의 대형 주철제 상수도는 내경에 대한 두께 비가 74에서 102정도로서 부품에서 발생하는 이론적 원주방향 응력은 18.5 MPa에서 25.5 MPa이 된다[14-15]. 따라서 외경 2000 mm이상의 대형 주철제 수도관에 균열이 발생하는 경우 해당 관의 설계응력이 본 연구에서 제안한 균열보수나사로 보수한 균열보수체의 인장강도보다 2.5배에서 3.1배 정도 높아 균열보수체의 구조 안전성을 확보하지 못해 균열보수나사로 균열을 수리할 수 없다. 그러나 한국에너지관리공단의 보일러 및 압력용기 기술규격(KPM: Korea Pressure Vessel Manufacture Code)에서 열교환기나 가열기등의 동체 재료로 회주철 KS D

4301의 GC 300을 제안하고 있고 해당 제품의 설계응력을 3.5 MPa이하로 규정하고 있다[16]. 따라서 GC 300으로 제작한 열교환기나 가열기등에 균열이 발생된 제품을 균열보수나사로 보수하게 되면 해당 제품의 균열보수체 인장강도에 대한 구조 안전율은 2.3이나 되어져 균열보수나사로 균열을 보수할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 화학 공장이나 협소한 공간에서 균열이 발생된 대형 주철 구조물이 보수 용접할 수 없는 환경에 있으면서 설계응력을 정확히 파악할 수 있는 경우 균열보수나사를 이용하여 균열을 수리할 수 있어 본 연구를 통하여 위급 상황에 대처할 수 있는 대형 주철 구조물의 균열보수방법을 확보할 수 있다.

Fig. 8 (a)는 노치가 존재하지 않는 평활 시험편에 대한 응력-변형률 선도를 나타낸 것으로 적은 변형률의 영향으로 응력 증가에 따른 변형률이 거의 선형적으로 증



(b) Deep-notched tensile test specimen repaired by 9 screws
Fig. 8. Stress-strain curve for tensile test specimen

가되다가 변형률 경화 현상을 보이지 않고 최종 파괴된다. 또한, Fig. 8 (b)는 깊은 노치 시험편을 9개의 균열보수나사로 보수한 인장시험편에 대한 인장 시험결과로서 Fig 8 (a)와는 다르게 변형률에 따른 응력이 선형적으로 증가하지 않고 변형률 경화되는 구간이 나타나고 최대응력 이후부터는 변형률에 따른 응력이 점진적으로 감소되고 있다. 이러한 결과는 인장시험편 노치부와 균열보수나사 사이의 마찰력이 인장 시험편의 변위 증가에 따라 비선형적으로 감소되기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 균열보수나사로 보수한 노치시험편의 경우도 파단 연신율이 0.28 %로 매우 낮은 파단 연신율을 보이고 있어 균열보수나사로 인하여 균열보수체에 하중지지능력은 제공해주는 것은 가능하나 연신율을 제공해 줄 수 없음을 알 수 있다.

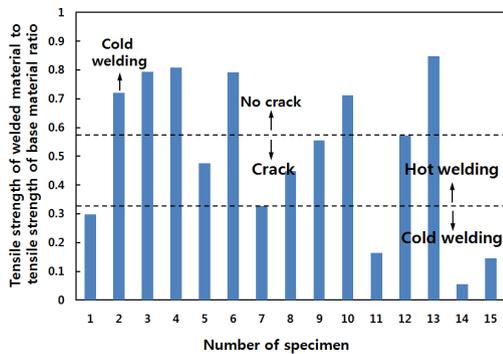


Fig. 9. Tensile strength of welded material to tensile strength of base material ratio and crack initiation in welded material

Fig. 9는 Jeong등[17-21]이 회주철등에 대한 용접재의 미시 조직과 인장강도시험을 기초로 입열량, 예열온도, 후처리온도, 용접속도등과 같은 용접 공정 변수에 따른 용접재에서의 균열 발생과 모재 인장강도에 대한 용접재 인장강도 비를 나타낸 것이다. 열간 용접에서는 시험 조건 중 44 %가 균열을 발생시켰고 냉간 용접에서는 83 %정도가 균열을 발생시켰다. 열간 용접에서의 균열은 주로 예열온도에 비하여 용접 입열량이 과도한 경우에만 발생되지만 냉간 용접에서의 균열은 최적의 용접 입열량 이상에서 발생된다. 이상의 결과는 열간 용접이 용접공정조건이 매우 넓은 것에 비해 냉간 용접은 매우 좁은 용접공정조건을 가지고 있어 현장 용접 작업자들이 이러한 용접 입열량등과 같은 용접공정조건을 최적으로 선정하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 열간 용접이

불가능한 현장 대형 주철 구조물이 냉간 용접되는 경우 용접 시공 후 일정 시간 이후에 모재부에서 균열이 시작되는 냉간 균열이 발생되어져 해당 구조물이 구조적으로 또는 기능적으로 문제가 되는 파손 사고가 자주 발생되고 있다.

한편, 본 연구에서의 균열 보수 나사를 이용한 냉간 체결방법은 냉간 용접으로 인해 용접 냉간 균열 발생 가능성이 높은 냉간 대형 주철 용접을 대체할 목적으로 개발된 부품 체결방법이다.

Fig. 9의 결과에서 회주철등에 대하여 모재 강도에 대한 냉간 용접재 강도 비의 최소값이 0.05이고 Fig. 8의 균열보수나사를 이용한 냉간 체결방법에 대하여 모재 강도에 대한 체결재 강도 비는 0.04이다. 따라서 냉간 용접재의 체결강도는 균열보수나사를 이용한 냉간 체결강도보다 1.25배 더 높아 응력 관점에서의 구조 안전성은 냉간 용접 방법이 균열보수나사를 이용한 냉간 체결 방법보다 더 양호하다. 그러나 균열이 존재하는 구조물의 파손 조건은 하한계 응력확대계수로 정의되며 냉간 주철 용접재의 발생 균열 길이에 따라 용접 부품의 구조 안전성이 결정된다. 즉, 냉간 주철 용접재는 부하 응력이 설계 응력아래에 있어도 발생 균열 길이에 따라 하한계 응력확대계수를 초과할 수 있어 보수적 구조물 체결방법으로는 부적절하다. 그러나 균열보수나사를 이용한 냉간 체결방법은 균열이 존재하지 않아 해당 냉간 체결된 구조물의 인장강도보다 낮게 설계응력이 설정되면 구조적 안전성이 확보될 수 있다. 이러한 관점에서 균열이 발생된 현장 대형 주철 부품이 저하중에서 사용되는 경우 균열 발생 가능성이 높은 냉간 용접 방법으로 수리하는 것 보다 균열보수나사를 이용하여 수리하는 것이 균열이 발생된 현장 대형 주철 구조물의 구조 신뢰성을 공학적으로 확보하는 데 훨씬 더 유리함을 알 수 있다.

5. 결론

1. 균열재 재료인 GC 300과 균열보수나사재료인 SUM 43의 경우 각각 286 MPa, 880 MPa을 보이고 있어 균열보수나사재료가 균열재 재료에 대하여 3배 이상의 강도를 가지고 있다.

2. GC 300 평활 인장 시험편은 인장강도가 286 MPa을 나타내고 있으며 균열보수나사 9개로 균열을 보수한 깊은 노치 시험편은 인장강도가 8.2 MPa로 나타나고 있어 균열을 보수한 깊은 노치 시험편의 인장강도는

평활 시험편 인장강도에 대하여 2.9% 정도로서 매우 적은 인장강도 값을 가지고 있다.

3. GC 300으로 제작된 열교환기나 가열기의 경우 3.5MPa이하의 설계 응력을 가지고 있어 균열보수단위체의 설계응력에 대한 인장강도의 안전율은 2.3이 되어 저 균열보수나사를 이용하여 대형 주철 구조물 균열을 보수하는 방법이 공학적으로 매우 유효하다.

4. 균열이 발생된 현장 대형 주철 부품이 지하중에서 사용되는 경우 균열 발생 가능성이 높은 냉간 용접 방법으로 수리하는 것 보다 균열보수나사를 이용하여 수리하는 것이 균열이 발생된 현장 대형 주철 구조물의 구조 신뢰성을 공학적으로 확보하는 데 훨씬 더 유리하다.

References

- [1] K. V. Sudhakar, "Cast iron component failure: A metallurgical investigation", *Archives of Foundry Engineering*, Vol.12 Special Issue 2, pp.67-70, 2012.
- [2] J. G. Kim, M. S. Kim, Y. S. Kim, "A Study on characteristics of repair welding for cast iron part of diesel engine for ship", *Transactions of the KSOE*, Vol.20, No.2, pp.41-45, 2006.
- [3] Y.G.Park, G.G.Kim, "A study on the redistribution of residual stress induced by hammer peening after cast iron welding", *Proceedings of the KWJS 2004 Fall Annual Meeting*, KWJS, Cheonan, South Korea, pp. 286-288, November 2004.
- [4] S. W. Choi, "A steel spacing for crack control in RC flexural members with an effective modulus of elastic", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.5 pp.98-105, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.5.98>
- [5] D. G. Kim, H. J. Park, D. U. Lee, "A study on crack reduction of covering concrete with fibers in basement", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.16, No.1 pp.814-821, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.1.814>
- [6] Y. H. Yeom, *Material Testings*, pp.342-349, Dong Myeong Publishers, 1989.
- [7] KS B ISO 2306, Drills for Use prior to Tapping Screw Threads, pp.1-11, Korean Standard, 1972.
- [8] KS B 1002, Hexagon Head Bolts and Hexagon Head Screws, Korean standard, 2016.
- [9] KS B 0201, Metric Coarse Screw Threads, pp.1-5, Korean Standard, 2016.
- [10] KS B 0233, Mechanical Properties of Steel Bolts and Screws, pp.1-27, Korean Standard, 2005.
- [11] KS D 4301, Grey Iron Castings, pp.1-7, Korean Standard, 2014.
- [12] KS D 3567, Free Cutting Carbon Steels, pp.1-20, Korean Standard, 2002.
- [13] KS B 0801, Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials pp.1-14, Korean Standard, 2017.
- [14] KCS 57 30 35, Pressure Testing and Inspection of Pipe installed in Water Supply, pp.1-3, Korean Construction Standards, 2017.
- [15] KS D 4311, Ductile Iron Pipes, pp.11-14, Korean Standard, 2015.
- [16] KEMCO, Korea Pressure Vessel Manufacture Code, Technical Report, KEMCO, Korea, P.94.
- [17] H. S. Jeong, K. S. Bang, C. S. Oh, "Study on metallurgical characteristic of weld metal for gray cast irons", *Journal of Welding and Joining*, Vol.36, No.1, pp.95-102, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.1.12>
- [18] R. Kumar, M. Kumar, V. Trivedi, R. Bhatnagar, "Evaluation of mechanical and microstructural properties of cast iron with effect of pre Heat and post weld heat treatment", *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, Vol.4, Issue 5, pp.1-6, May 2017.
- [19] H. S. Jeong, K. S. Bang, "Friction weldability of grey cast iron-by the concept of friction weld heat input parameter-", *Journal of Welding and Joining*, Vol.32, No.3, pp.95-101, 2014. DOI: <http://doi.org/10.5781/JWJ.2014.32.3.95>
- [18] Francisco-Javier Cárceles-Carrasco, Miguel-Angel Pérez-Puig, Manuel Pascual-Guillamón, Rafael Pascual-Martínez, "An analysis of the weldability of ductile cast iron using inconel 625 for the root weld and electrodes coated in 97.6% nickel for the filler welds", *Metals*, Vol.6, No.283, pp.1-13, 2016. DOI: <http://dx.doi:10.3390/met6110283>
- [20] Ronny M. Gouveia, Francisco J. G. Silva, Olga C. Paiva, Maria F. Andrade, Luiz Silva, Paulo C. Moselli, Konrad J. M. Papis "Study of the heat-treatments effect on high strength ductile cast iron welded joints", *Metals*, 7, 382, pp.1-25, 2017. DOI: <http://dx.doi:10.3390/met7090382>

이 성 룡(Sung-Riong Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (학사)
- 1990년 8월 : 동아대학교 대학원 금속공학과 (공학박사)
- 1994년 11월 ~ 1996년 9월 : (주)서경열처리, 대표이사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 재료융합공학부 교수

<관심분야>

화학야금

이 등 준(Dong-Jun Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 육군3사관학교 조직관리학과 (학사)
- 2019년 2월 : 강원대학교 대학원 재료금속공학과 (공학석사)
- 2003년 3월 ~ 2009년 9월 : 육군대위
- 2013년 2월 ~ 현재 : (주)일지테크 원자재 관리팀 과장

<관심분야>

재료강도학

조 석 수(Seok-Swoo Cho)

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 기계설계공학과 교수

<관심분야>

재료강도학, 전산구조해석