



균열 보수 락을 이용한 대형 주철 균열재의 냉간 체결 방법에 관한 연구

천위안^a, 조석수^{b*}

Study on the Cold Joint Method for Cracked Parts of Large Cast Iron using Crack Repair Locks

Yuan Chen^a, Seok Swoo Cho^{b*}^a Department of Mechanical-Computer-Industrial Engineering, Graduate School, Kangwon National University^b Division of Mechanical Design Engineering, Kangwon National University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	31	January	2023
Revised	11	April	2023
Accepted	24	April	2023

Keywords:

Cracked cast iron component
Cold repair welding
Crack repair lock
Stress concentration factor
Crack repair model
Joint efficiency of crack repair model

ABSTRACT

Cracks in large cast iron components are often repaired by cold welding repair. However, this method is often unsuccessful owing to improper pre- and post-heat treatment conditions. In this study, a mechanical joining method using crack repair locks is proposed as a crack repair method for large cast iron components. The aspect ratio of the height to the width in the FEA model for crack repair is 0.95. The structural analytical error of the structural strength test using the proposed crack repair model is 4.8%. The optimization results for joint efficiency of the crack repair component indicate 90%. However, the experimental joint efficiency of crack repair components ranged from 17.7% to 30% owing to the realistic machining conditions of the crack repair site. Therefore, to achieve a high joint efficiency for crack repair components using crack repair locks, the spacing between the crack repair locks must be minimized according to field conditions.

1. 서론

주철은 용탕의 유동성, 주조성, 내마멸성, 진동 감쇠 능력, 기계 가공성, 경제성 등이 우수하여 곡면이 있는 대형 구조물은 기계 가공성이나 경제성 측면에서 주물을 이용하여 제작하는 것이 용접 이음이나 리벳이음방법으로 제작하는 것보다 매우 유리하다. 선박 용 엔진 부품등과 같은 대형 주철 부품들은 장기간 사용시 부식, 파공, 균열등이 발생하여 사용이나 운전에 지장을 주는 사례가 빈번하여 부품 파손에 따른 교환이 불가능하여 보수 용접을 하는 경우가 많다. 주철의 냉간 보수 용접시 용착 불량, 잔류 응력으로 인한 균열 발생, 열영향부의 경도 상승등이 발생한다. 이러한 현상을 완화시키기 위하여 고 Ni 및 Ni-Fe계통 용접봉을 사용하여 용접 결합과

잔류응력을 저감시키는 냉간 아크 용접법이 개발되었다. 그러나 냉간 보수 용접은 100~200°C 정도의 예열이 필요하고 각 용접 패스마다 용접 패스 길이를 짧게 하고 반복적인 피닝(peening) 작업이 필요하며 용접 완료 후 상온으로 서냉시키는 작업이 필요하다^[1].

주철 보수 용접하는 장소는 협소한 공간이 많고 화학 물질 등이 있어 주철재를 현장에서 예열하는 것은 작업 여건상 매우 어렵다. 따라서 냉간 보수 용접에 필요한 최소한의 요구 조건을 지켜지지 않는 경우가 많아 일반적으로 균열을 냉간 보수 용접으로 보수한 균열이 재파괴되는 경우가 빈번히 발생된다^[2]. 따라서 본 연구에서는 위험 물질이 있거나 협소한 공간 또는 보수 작업이 곤란한 상황이 있는 대형 주철 구조물이 구조 하중을 받아 균열이 발생된 경우 먼저 균열 멈춤 구멍으로 균열 선단 근방의 응력집중을 완화시킨

* Corresponding author. Tel.: +82-33-570-6394

E-mail address: sscho394@kangwon.ac.kr (Seok Swoo Cho).

뒤, 균열 보수 락(균열 보수 락은 별칭으로 메탈락(metal lock) 또는 메탈키(metal key)라는 용어로 사용되나 본 논문에서는 의미의 명확성을 부여하기 위하여 균열 보수 락으로 명명함)이라는 냉간 체결도구를 적용하여 균열이 발생된 부품을 서로 기계적으로 연결시켜 균열 발생 부분과 균열 미발생 부분에서 구조하중을 서로 분담하도록 하는 긴급 균열 보수방법을 제안하고자 한다.

2. 본 론

2.1 일반적 균열 보수 방법

ASME SEC III, VII, I X와 ASME B 31.1 및 AWS D 1.1에서는 용접 구조물이나 기계 부품에 균열이 발생되는 경우 균열 성장 부분을 기계적 방법이나 그라인딩으로 모재로부터 제거하고 제거된 모재 부분에 모재와 동일하거나 그에 상당하는 용접봉의 용가재로 해당 부분을 복원하는 보수 용접을 이용하여 발생 균열을 제거함과 동시에 저하된 구조 강도를 회복시키는 방법을 규정하고 있다^[3]. 그러나 대형 주철 구조물의 경우 보수 용접에서 요구되는 용접 전 및 후 열처리 등의 방법을 적용하기에는 설치 장소가 협소하거나 해당 기계 부품이 화재나 폭발 위험성을 있는 화학물을 다루는 경우 보수 용접을 적용하기에는 무리한 경우가 많다.

2.2 균열 보수 락을 이용한 균열 보수 방법

Fig. 1과 2는 균열 보수 락과 균열 발생 부품에 균열 보수 락을 망치로 때려 박아 설치하기 위한 균열 보수 락 지그를 나타낸 것이다^[4]. 균열 보수 락은 7개의 동일 직경 8 mm 플랜지(flange) 기초원을 축 방향 일직선으로 10 mm 간격으로 배열한 뒤 각각의 플랜지 기초원을 폭 5 mm의 직사각형 넥(neck)으로 연결한 것이다. 따라서 균열 보수 락의 플랜지 기초원은 서로 중첩되지 않아 인접

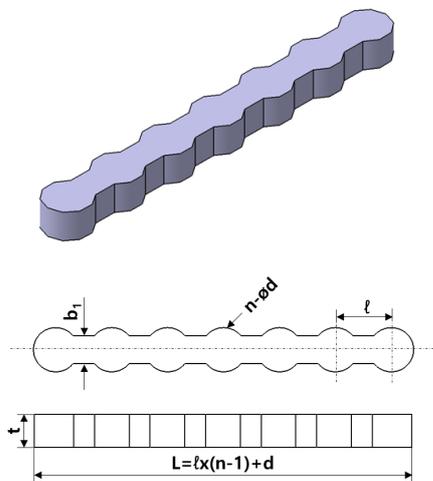


Fig. 1 A crack repair lock

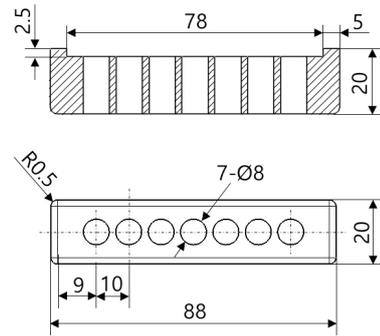


Fig. 2 The jig for installation of crack repair locks

Table 1 Normalized dimension of crack repair locks

Breadth of neck b_1 (mm)	Diameter of flange d (mm)	Distance between flanges l (mm)	Thickness t (mm)	Number of flanges n
3	1.6 b_1 (8)	2 b_1 (10)	1 b_1 (5)	5,7,9
4				
5				
6				

한 플랜지 기초원사이의 직사각형 넥을 자작한 넥 공구와 망치로 가볍게 절단되도록 직사각형 높이를 최소화하여야 하였으며 본 연구에서는 해당 두께가 5 mm가 되도록 하였다.

Table 1은 중화인민공화국 교통부의 지도성 기술문건인 선박 기계부분의 금속접합보수기술^[5]을 기초로 균열 보수 락 치수를 균열 보수 락의 넥 폭 b_1 을 매개 변수로 하여 나타낸 것이다. 따라서 균열 보수 락의 플랜지 직경 d 는 균열 보수 락의 넥 폭 b_1 의 1.6배인 8 mm로, 균열 보수 락 플랜지 사이의 간격은 균열 보수 락의 넥 폭 b_1 의 2배인 10 mm로, 균열 보수 락 두께는 균열 보수 락의 넥 폭의 1배인 5 mm로 설정하였으며 균열 보수 락의 플랜지 개수 n 은 균열 보수 락의 넥 폭 b_1 에 의하여 결정되며 Table 1에 의하면 7개이다.

3. 구조해석과 구조강도시험

3.1 균열 발생 부품과 균열 보수 락 재료

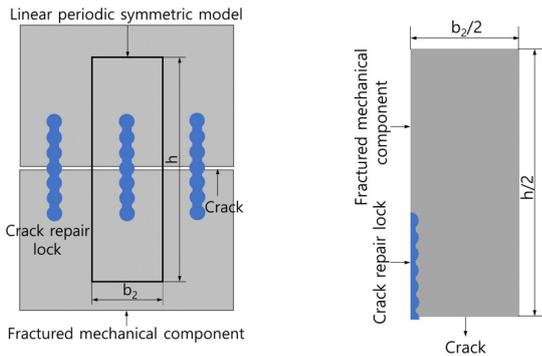
Table 2는 균열 발생 부품으로 사용되는 GC 150과 균열이 발생된 부분을 보수하기 위한 균열 보수 락 재료인 SCM 440의 기계적 성질을 나타낸 것이다^[6].

3.2 균열 보수 모델의 선정

Fig. 3(a)는 대형 주철 구조물에 발생된 균열을 균열 보수 락을 이용하여 균열을 보수한 결과의 일부분을 무한 평판에 나타낸 것

Table 2 Mechanical properties of crack repair components and locks

Components	Material specification	Poisson's ratio	Elastic modulus (GPa)	Tangent modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Yielding strength (MPa)	Elongation (%)
Crack repair component	GC 150	0.2	116	8.2	180	140	0.77
Crack repair lock and jig	SCM 440	0.3	200	8.5	980	833	12



(a) Linear periodic symmetric model (b) 1/4 symmetric model

Fig. 3 Finite element model for crack repair process using crack repair locks

이다. 균열 성장을 억제하기 위하여 균열 성장 방향에 균열 보수 락을 일정 간격으로 설치한 것이다. 본 연구에서는 균열 보수 락을 이용한 균열 보수 모델을 해석적으로 모델링하기 위하여 균열 보수 락은 균열에 대한 수평 대칭성을 가지고 있고 선형적으로 일정 간격 b_2 의 주기성을 가진 수직 대칭성을 가지고 있는 것으로 가정한다. 따라서 본 연구에서는 균열 보수 공정의 유한요소해석모델을 Fig. 3(a)의 전체적인 균열 보수 모델에서 하나의 균열 보수 락으로 구성하는 선형 주기 반복적 대칭 모델로 설정하였으며 Fig. 3(a)의 전체 균열 보수 모델에서 직사각형 실선으로 표시하였다.

균열 보수 락을 적용하여 균열 보수하는 제품은 제품 크기에 비하여 두께가 얇은 상태의 2차원 평면 응력 상태이면서 균열 보수 락의 치수가 균열 발생 제품 치수에 비하여 매우 작다. 또한, 균열 보수 락은 균열방향을 따라 규칙적 간격으로 설치된다. 따라서 균열 보수 모델은 Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 균열 방향의 수직방향에 대한 대칭성과 균열 보수 모델의 선형 주기성 방향에 대한 수평방향 대칭성을 고려하여 2차원 1/4 대칭 유한요소해석모델로 구성할 수 있다.

ANSYS Workbench Structural에서는 비접촉구조해석모델과 접촉구조해석모델을 동시에 제공하고 있다. 비접촉구조해석모델은 해석 대상을 하나의 모델로 가정하여 해석하는 것이고 접촉구조해석 모델은 해석 대상을 다수의 부품이 접촉 상태에 있다고 가정하여 해석하는 것이다. Table 3은 ANSYS Workbench Structural에서 제공하고 있는 접촉구조해석모델을 나타낸 것으로 bonded,

Table 3 Classification of contact types and behaviors^[7]

Classification of contact		Gap open	Sliding
Noncontact		No	No
Contact	Bonded	No	No
	Rough	Yes	No, infinite μ
	No separation	No	Yes, $\mu = 0$
	Frictionless	Yes	Yes, $\mu = 0$
	Frictional	Yes	Yes, $F_{sliding} > F_{friction}$

frictional, frictionless, no separation, rough의 5가지 접촉해석 옵션을 제공하고 있다^[7]. Bonded 접촉조건은 접촉부에서 두 부품사이에서 갭과 슬라이딩이 발생되지 않는다. Frictional 접촉조건은 두 부품사이의 접촉부분에서 갭과 슬라이딩이 동시에 발생할 수 있으나 frictionless 접촉조건은 두 부품사이의 접촉부분에서 갭과 슬라이딩이 동시에 발생하면서 마찰력이 작용하지 않는다. No separation 접촉조건은 갭이 발생하지 않으면서 슬라이딩이 발생하면서 마찰력이 작용하지 않는다. Rough 접촉조건은 갭은 발생되나 슬라이딩은 발생되지 않는다.

균열보수 부품은 GC 150로서 취성재료이고 균열 보수 락은 SCM 440로서 연성재료로 가정하였다. 따라서 균열 보수 부품의 파손을 결정짓는 응력으로서의 최대주응력으로 설정하였고 균열 보수 락의 파손을 결정짓는 응력으로서의 최대 von-Mises 응력으로 설정하였다. 하중조건은 예비균열 보수 모델에 대한 구조강도 시험결과를 기초로 인장강도 24.8 MPa을 부여하였고, 경계조건은 수평 방향 운동을 제어하기 위하여 대칭 Y축에 수평 방향 변위가 0이 되도록 설정하고 수직 방향 운동을 제어하기 위하여 대칭 X축에 수직 방향 변위가 0이 되도록 설정하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 수행한 균열 보수 모델의 구조강도시험에 대한 유한요소해석결과에서 최대주응력과 최대 von-Mises 응력 발생 위치를, Fig. 5는 Andreas^[8]가 수행한 균열 보수 모델에 대한 구조강도시험결과를 나타낸 것이다. 균열 보수 모델에 대한 구조해석결과에서 최대 주응력과 최대 von-Mises 응력 발생 위치는 균열 보수 부품에 대한 구조강도시험에서의 균열발생위치와 일치하여야 한다.

Fig. 5에서 균열 보수 모델에 대한 구조강도시험에서 균열은 균열 보수 락의 우측 상단과 접촉하고 있는 균열 보수 부품의 우측 상단에

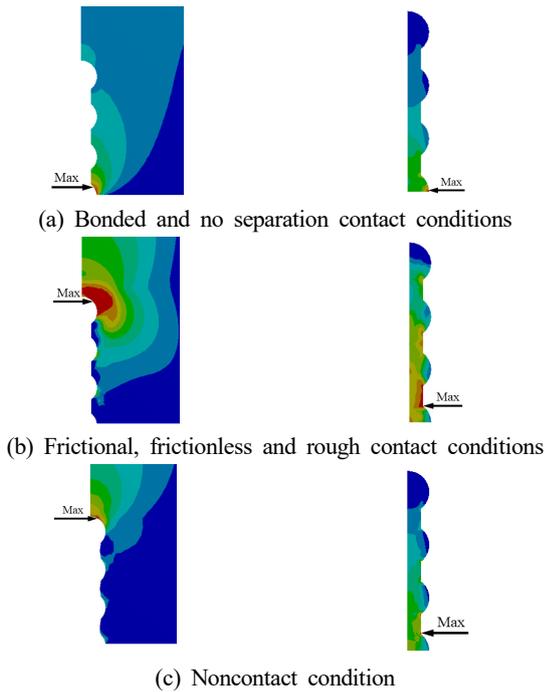


Fig. 4 Identification of locations with maximum contact stresses in the crack repair model

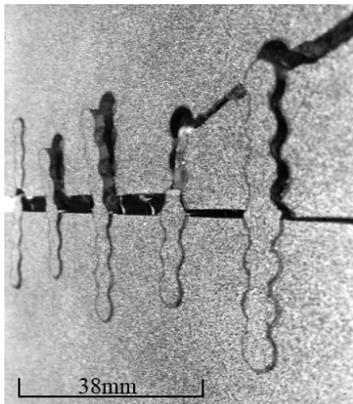
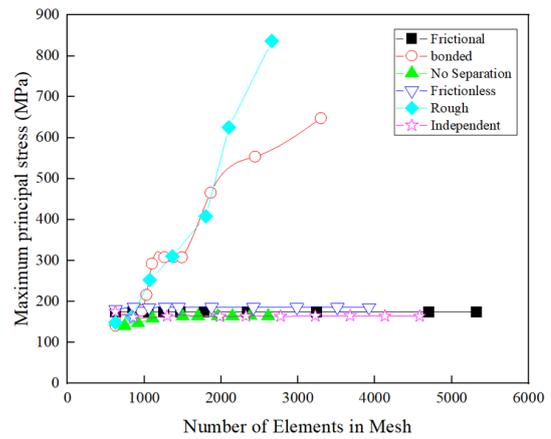


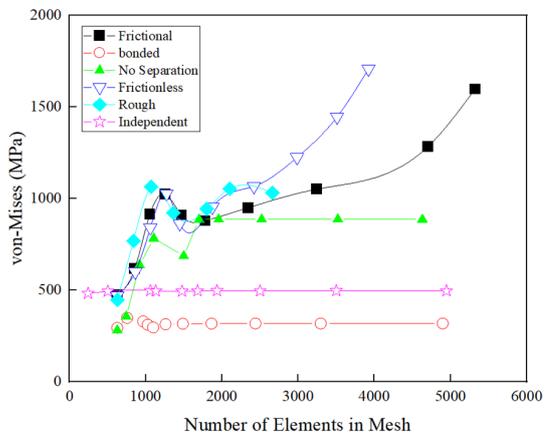
Fig. 5 Identification of location of crack initiation and propagation in the crack repair model^[8]

서 발생되었으며 균열 보수 락에서는 발생되지 않았다. 비접촉구조 해석과 frictional, frictionless and rough 접촉구조해석에 의한 최대주응력은 균열 보수 부품의 우측 상단에서 발생되었으나 bonded and no separation 접촉구조해석에 의한 주응력은 균열 보수 부품의 우측 하단에서 발생되었다. 따라서 균열 보수 모델에 대한 구조해석모델로 비접촉구조해석과 frictional, frictionless and rough 접촉구조해석으로 선정할 수 있다.

Fig. 6은 균열 보수 모델에 대한 구조해석모델을 선정하기 위하여 비접촉과 접촉구조해석모델에 대하여 유한요소개수에 따른 최대주응력과 최대 von-Mises 응력을 동시에 나타내었다. 비접촉구조해석모델에서는 최대 주응력과 최대 von-Mises 응력에 대하여



(a) The crack repair component

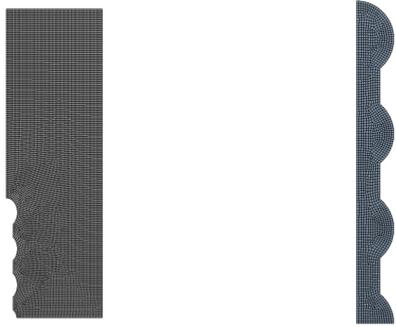


(b) The crack repair lock

Fig. 6 Convergence process of the finite element analysis

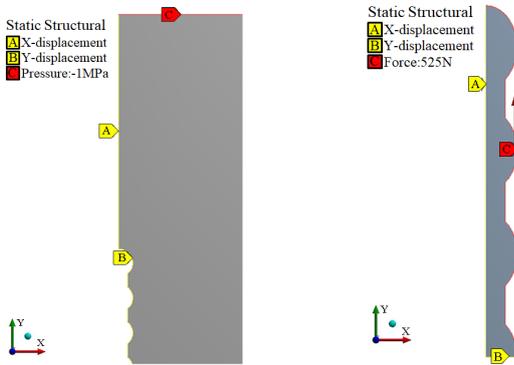
유한요소개수에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있어 비접촉유한 요소해석모델이 해석 수렴성 특성을 보이고 있다. 그러나 접촉유한 요소해석모델에서 최대주응력은 bonded와 rough 접촉 조건에서 유한요소개수가 증가함에 따라 증가하고 있으며 최대 von-Mises 응력은 frictional, frictionless, no separation, rough 접촉 조건에서 유한요소개수가 증가함에 따라 증가하고 있어 이 조건에서 유한 요소해석이 발산되고 있다. 따라서 최대 주응력과 von-Mises 응력에 대하여 유한요소해석 개수가 증가함에 따라 그 값이 일정한 값을 동시에 보이는 접촉구조해석조건은 존재하지 않는다. 한편, 최대 주응력과 von-Mises 응력이 유한요소개수가 증가함에 따라 그 값이 일정한 값을 보이는 유한요소해석 수렴성을 보이는 해석 모델 조건은 비접촉구조해석모델이다^[9]. 이상의 Fig. 4와 Fig. 5 및 Fig. 6의 구조강도시험과 해석결과에서 균열발생위치와 최대주응력발생위치 및 유한요소해석 수렴성을 동시에 만족시키는 구조해석조건은 비접촉구조해석뿐이어서 본 연구에서는 균열 보수 모델에 대한 구조해석모델로 비접촉구조해석모델을 선정한다.

Fig. 7은 균열 보수 모델의 평면 1/4 대칭 구조 해석 모델을 ANSYS Workbench R18의 Static Structural로 모델링한 것을



(a) Crack repair component (b) Crack repair lock

Fig. 7 FEA meshing of the crack repair component and the crack repair lock



(a) Crack repair component (b) Crack repair lock

Fig. 8 Boundary and load conditions for the crack repair component and the crack repair lock in FEA

나타낸 것으로 유한요소해석 모델 폭과 높이가 각각 10 mm~300 mm, 70 mm~400 mm이다. 균열 보수 모델의 1/4 대칭 유한요소해석모델을 2차원 평면 모델 메싱 툴(meshing tool)인 face meshing과 0.5 mm와 0.15 mm의 sizing meshing을 이용하여 메싱한 결과를 나타낸 것이다. ANSYS workbench R18 의 Static Structural를 이용하여 균열 보수 모델의 정적 구조 해석모델 메싱에 대한 aspect ratio와 skewness 및 orthogonal quality의 허용값은 각각 1-5, 0.5미만, 0.05초과로서^[10]균열 보수 모델에 대한 허용 aspect ratio 범위와 최대 skewness 및 최소 orthogonal quality는 각각 1-2.1, 0.5이내, 0.79이상이므로 해당 메싱 파라미터의 허용값에 들어 오고 있어 충분한 구조 해석 정밀도를 가지고 있다.

Fig. 8은 균열 보수 부품과 균열 보수 락에 대한 경계와 하중 조건을 나타낸 것이다. 균열 보수 부품의 경우 해당 모델의 좌측과 우측 끝단에 X축 방향의 변위 제어 조건(A)과 균열 보수 락 고정 지점에 Y축 방향의 변위 제어 조건(B)을 적용하였다. 또한, 균열 보수 락의 경우 해당 모델의 좌측 끝단에 X축 방향의 변위 제어 조건(A)과 균열 보수 락의 수평 대칭 영역에 Y축 방향의 변위 제어 조건(B)을 적용하였다. 또한, 하중조건(C)은 균열 보수 부품의 경우 해당 부품의 상단 끝단에, 균열 보수 락의 경우 해당 부품의 우측

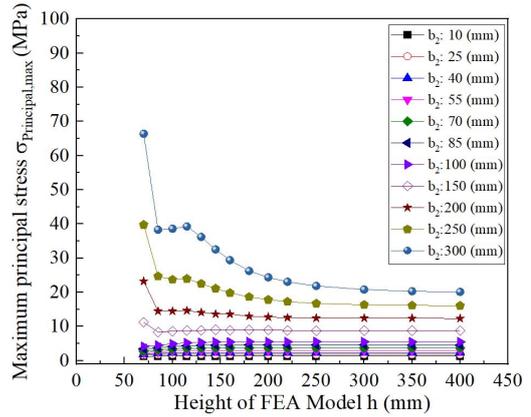


Fig. 9 The relationship between FEA model height and maximum principal stress in the crack repair component

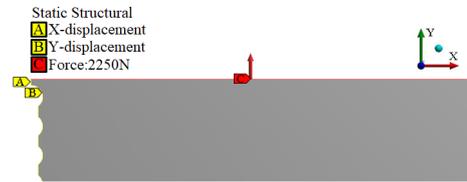


Fig. 10 A crack repair component subjected to eccentric load

끝단 전체에 Y 축방향의 수직 하중을 부여하였으며 그 크기는 1 MPa ($\sigma_A(N/mm^2) \times A(mm^2) = 1 \times (70/2) \times 15 = 525 \text{ N}$)이다.

본 연구에서는 균열 보수 모델 폭 b_2 와 높이 h 의 비를 구하기 위한 파라미터로 균열 보수 부품에서 발생하는 응력집중계수를 선정한다. 따라서 균열 보수 부품에 부하되는 하중이 1 MPa의 분포 하중으로 선정하면 해당 균열 보수 부품의 최대주응력이 해당 균열 보수 부품의 응력집중계수와 같으며 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$K = \frac{\sigma_{\text{Principal,max}}}{\sigma_{\text{Nominal}}} = \frac{\sigma_{\text{Principal,max}}}{1\text{MPa}} = \sigma_{\text{Principal,max}} \quad (1)$$

단, σ_{Nominal} : 공칭응력(MPa), $\sigma_{\text{Principal,max}}$: 최대주응력(MPa).

3.3 균열 보수 모델의 구조해석

균열 보수 모델에서 발생하는 응력은 각 구성 부품 치수에 영향을 받지 않도록 각 구성 부품 치수에 따른 발생 응력의 크기를 검토할 필요가 있다. Fig. 9는 균열 보수 부품에서의 유한요소모델의 높이 h 와 폭 b_2 에 따른 최대주응력을 나타낸 것이다. 최대주응력은 유한요소모델 높이 h 가 증가하면 감소하나 유한요소모델 폭 b_2 가 증가하면 증가한다. 특히, 이러한 경향은 유한요소모델 높이 h 가 낮거나 유한요소모델 폭 b_2 가 크면 더 강하게 나타나고 있으며 해당 모델의 높이 h 와 폭 b_2 가 각각 70 mm, 폭 300 mm일 때 가장 강하게 나타내고 있다.

Fig. 10은 균열 보수 부품 유한요소모델의 높이 h 와 폭 b_2 가 각각 70 mm, 폭 300 mm일 때의 유한요소모델에서 분포하중을 집중하중으로 바꾼 하중(C)과 균열 보수 락에 의한 경계조건(A, B)을 동시에 나타내었다. 균열보수 부품은 분포압력하중 -1 MPa에 해당하는 $-2,250$ N($-1 \times \frac{b_2}{2} \times t = -1 \times 150 \times 15$)이라는 수직 하중 이외에 경계조건인 균열 보수 락 설치 위치와 하중 부하 지점의 도심 위치가 서로 달라 이로 인한 편심 모멘트인 $2,250 \times 0.075 = 168.75$ (N·m)를 동시에 받고 있다. 균열 보수 부품은 유한요소모델 폭이 증가하면 하중부담면적과 부하하중도 증가함과 동시에 경계조건지점과 하중부하지점사이의 거리가 증가되어서 편심 모멘트도 증가하게 된다. 따라서 균열 보수 부품에서 발생하는 최대주응력은 유한요소모델 폭이 증가하면 하중부담면적과 부하하중 증가이외에 편심 모멘트 증가에 의하여 급격하게 증가 된다. 즉, 이것은 유한요소모델높이 h 가 작으면서 유한요소모델 폭 b_2 가 증가하게 되면 수직하중에 의한 수직응력과 유한요소모델 폭에 의한 편심 굽힘응력이 동시에 증가하기 때문이다. 한편, 그림에서 유한요소모델 높이 h 가 증가하거나 폭 b_2 가 감소하게 되면 균열 보수 부품 유한요소모델의 최대주응력에 미치는 유한요소모델 치수의 영향이 적게 나타나는 영역이 존재한다.

Fig. 11은 균열 보수 부품의 유한요소모델에서 해당 모델 치수에 영향을 적게 나타나는 유한요소모델 폭 b_2 에 대한 유한요소모델 높이 h 를 나타낸 것으로 그 관계를 다음 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$h = 62 + 0.95b_2 \quad (2)$$

식 (2)에서 균열 보수 모델은 균열 보수 락의 플랜지 직경과 전체 길이를 기초로 균열 보수 모델 폭 b_2 가 증가함에 따라 해당 모델 폭 b_2 의 증가량에 대하여 해당 모델 높이 h 의 증가량의 비가 0.95

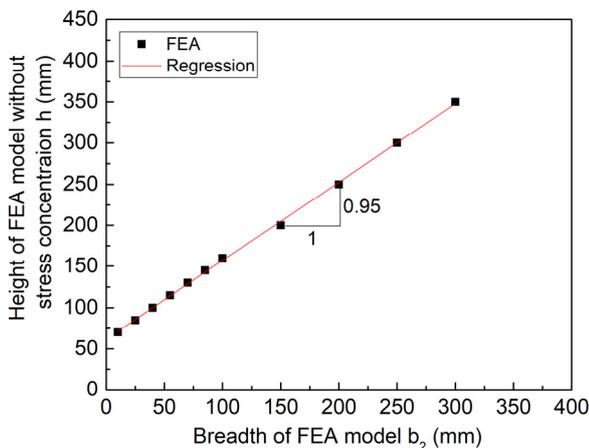


Fig. 11 The relationship between the height of the FEA model without stress concentration and the breadth of the FEA model in the crack repair component

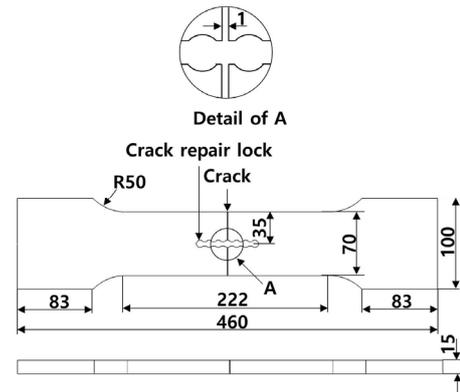


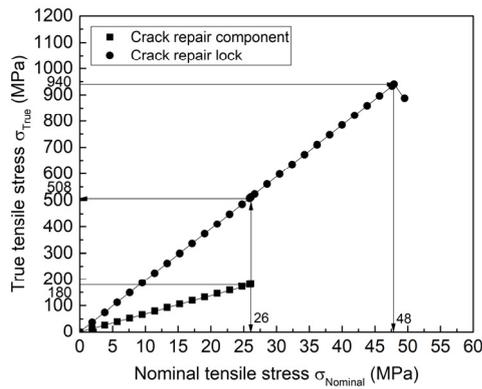
Fig. 12 Structural strength specimen repaired using a crack repair lock

정도가 되도록 해당모델 높이 h 의 크기도 증가하게 된다.

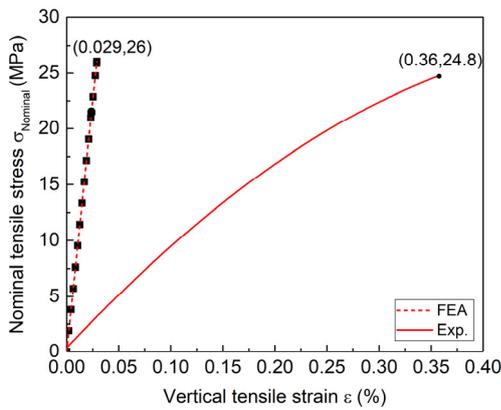
3.4 균열 보수 모델의 구조강도시험

Fig. 12은 균열 보수 모델의 유한요소해석결과의 정확성을 검토하기 위한 구조강도시험편을 나타낸 것이다. 균열 보수 모델의 구조강도시험편은 KS B 0801 14(B)^[11] 인장시험편을 준용하여 제작하였다. 균열 보수 모델에 대한 구조강도시험편의 폭과 높이 및 두께는 각각 70 mm와 222 mm 및 15 mm이다.

Fig. 13은 Fig. 12의 균열 보수 모델에 대한 구조강도시험편을 이용하여 구조해석한 결과와 구조강도시험을 수행한 결과를 비교한 것이다. 여기서 균열 보수 모델에 대한 구조강도시험편은 폭과 높이는 각각 70 mm와 222 mm로서 응력분포에 영향을 미치는 구조강도시험편의 폭과 높이 영향을 없애기 위한 식 (2)의 균열 보수 모델 폭에 대한 높이의 관계를 만족시키고 있다. 공칭응력응력 $\sigma_{Nominal}$ 은 부하하중을 시험편의 공칭 단면적(70 mm×15 mm)으로 나눈 값이고 진응력은 σ_{True} 은 각 부품에 대한 유한요소해석에서 구한 최대주응력 값이다. 수직 변형률은 유한요소해석과 구조강도시험에서 구한 값을 각각 표시한 것이다. 구조강도시험에 대한 유한요소해석에서 최종입력하중은 균열 보수 부품과 균열 보수 락 중 각 해당 재료의 인장강도에 도달하는 입력하중으로 하였다. 유한요소해석에서는 공칭 응력을 각각 압력 하중으로 부하하였으며 5 MPa씩 증가시켰으며 마지막에는 26 MPa를 부하했으며 각각의 공칭응력에 대한 전체 수직 변형률을 표시한 것이 Fig. 13(b)이다. 그림에서 균열 보수 부품 재료의 인장강도 180 MPa에 해당하는 최대공칭응력은 26 MPa이나 균열 보수 락 재료의 경우 공칭응력 26 MPa에 해당하는 최대 von-Mises 응력은 508 MPa로서 균열 보수 락 재료의 인장강도 980 MPa에 도달하지 못하고 있어 인장강도에 대한 구조 안전율은 2정도이다. 균열 보수 모델에 대한 구조해석에서 구한 연신율은 0.029%이고 구조강도시험에서는 0.36%로서 후자의 경우가 전자의 경우에 비하여 10배정도 더 크



(a) The relationship between nominal tensile stress and true tensile stress in the crack repair component and the crack repair lock



(b) Stress-strain curve

Fig. 13 Stress-strain curve of the structural strength test specimen with 70 mm crack repair lock spacing

다. 이러한 결과는 구조강도시험에서 균열 보수 부품과 균열 보수 락이 상대적으로 미끄러져 균열 보수 부품의 균열 보수 락 자리가 수직과 수평방향으로 이동하기 때문이다. 즉, 구조강도시험에서 발생하는 수직 변형량은 균열 보수 부품과 균열 보수 락에서 발생하는 탄성 변형량과 균열 보수 부품과 균열 보수 락사이의 미끄러짐으로 인한 병진 운동 변위를 더한 값이다. 따라서 구조강도시험에서 발생하는 변형률은 구조해석에서 나온 변형률보다 과도하게 크게 된다. Fig. 13(b)에서 균열 보수 모델에 대한 인장강도는 구조해석의 경우 26 MPa이고 구조강도시험의 경우 24.8 MPa이다. 공칭응력관점에서 구조강도시험에 대한 구조해석의 오차($=\frac{1.2}{24.8} \times 100 = 4.8\%$)는 4.8%로서 일반적 공학적 오차 범위 5%내로 수렴되고 있어 본 연구에서 사용한 균열 보수 모델에 대한 구조해석모델은 충분한 공학적 신뢰성을 가지고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 14은 균열 보수 락의 설치 간격이 70 mm때의 균열 보수 모델에 대한 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 유한요소해석결과를 최대 응력과 수직 변형량으로 각각 나타낸 것이다. 이때 균열 보수 모델 높이는 130 mm이다. 최대응력은 균열 보수 부품의 경

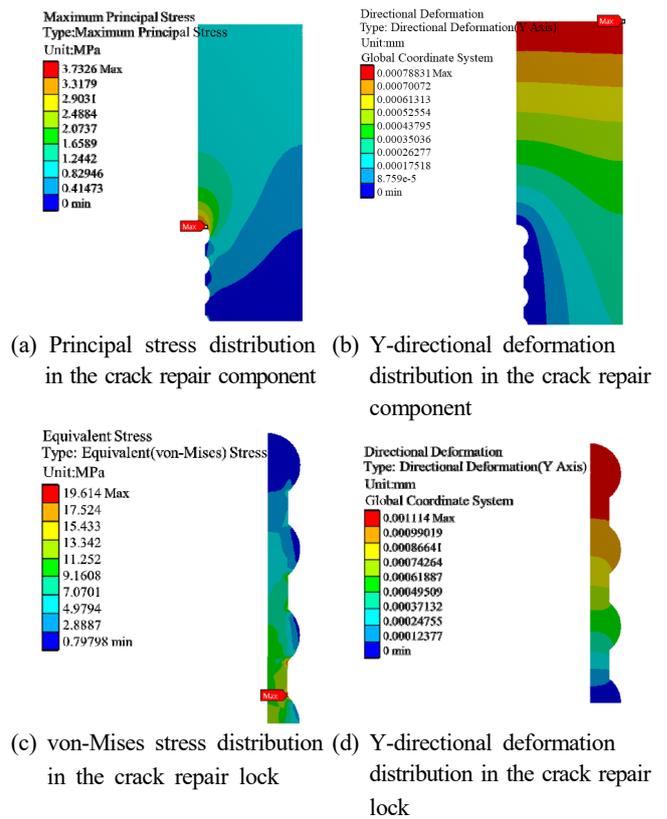


Fig. 14 FEA results of the crack repair model with 70 mm lock spacing

우 최대응력이 균열 보수 락이 설치되는 우측의 최상단부에서 발생되고 균열 보수 락의 경우 최대 von-Mises 응력이 균열 보수 락의 우측 최하단부 플랜지와 넥 연결부에서 발생된다.

3.5 균열 보수 모델의 이음효율

균열 보수 락을 이용한 구조물 접합은 접합 대상의 배치 관점에서는 맞대기 용접의 맞대기 이음이나 이음 도구 관점에서는 리벳 이음과 유사하다. 균열 보수 락을 이용한 구조물 접합은 주로 제품 치수에 비하여 두께가 얇은 셸 구조물에 적용하는 것이 보통이므로 판 단면에 대한 수직하중을 받으므로 균열 보수 부품과 균열 보수 락이 모두 수직 하중에 의하여 파손될 것이다. 따라서 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이론적 및 해석적 이음 효율 η (joint efficiency of crack repair components: JEC와 joint efficiency of crack repair locks: JEL)는 균열 보수 모델의 예비 인장시험을 기초로 균열 보수 락이 없을 때의 균열 보수 부품이 부담할 수 있는 최대인장하중에 대한 균열 보수 락이 존재할 때의 균열 보수 부품이 부담할 수 있을 때의 최대인장하중의 비와 균열 보수 락이 없을 때의 균열 보수 부품이 부담할 수 있는 최대인장하중에 대한 균열 보수 락이 부담할 수 있을 때의 최대인장하중의 비로서 다음 식 (3)과 같이 각각 정의할 수 있다^[12].

Table 4 Joint efficiency evaluation of the component and the lock in the crack repair model

Breadth of FEA model b_2 (mm)	Height of FEA model without stress concentration h (mm)	Maximum tensile stress σ (MPa)			Joint coefficient (%)	
		Material of crack repair component	Crack repair component	Crack repair lock	crack repair component (JEC)	Crack repair lock (JEL)
70	130	180	55	48	30.6	26.7

Table 5 Experimental investigations of joint efficiency in gray cast iron joints

Method of joints	Tensile strength (MPa) (Specification)		Preweld heat treatment temperature (°C)	Postweld heat treatment temperature (°C)	Joint tensile strength (Mean, SD) (MPa)	Occurrence of cracks	Joint efficiency (Mean, SD) (%)
	Electrode or crack repair	Grey cast iron					
Welding ^[13]	400 (55Ni-45Fe)	255 (ASTM278-53 class 30)	316	649	229~250 (233, 21)	No	90~98 (95, 8.2)
	282 (Ni-rod and Ni-Rod 55)	117	96	-	0~37 (23, 11)	Yes	0~31 (19.8, 9.4)
Crack repair lock ^[14]	780 (W.No.1.7033.)	245(GG-25/W.Nr.0.6025)	-	-	22.4~74.1 (52.6, 20.8)	No	9~30 (21.5, 8.5)

$$\eta_{C, FEA} = \frac{F_{UL, crack\ repair\ component}}{F_{UL, crack\ repair\ component\ without\ lock}} \times 100 (\%)$$

$$\eta_{L, FEA} = \frac{F_{UL, crack\ repair\ lock}}{F_{UL, crack\ repair\ component\ without\ lock}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

단, $F_{UL, crack\ repair\ component\ without\ lock}$: 균열 보수 락이 배치되지 않은 균열 보수 부품의 최대인장하중, $F_{UL, crack\ repair\ component}$: 균열 보수 부품의 최대인장하중, $F_{UL, crack\ repair\ lock}$: 균열 보수 락의 최대인장하중

Table 4는 유한요소법을 이용하여 균열 보수 모델의 기계적 이음효율을 해석적으로 계산한 것이다. 균열 보수 락을 이용한 균열 보수 부품의 해석적 이음 효율 η_{FEA} 는 균열 보수 부품 재료의 인장강도가 180 MPa이고 균열 보수 부품의 인장강도가 55 MPa이므로 균열 보수 부품의 이음 효율 $\eta_{C, FEA}$ 은 30.6%이다. 또한, 균열 보수 락의 이음 효율 $\eta_{L, FEA}$ 은 균열 보수 부품 재료의 인장강도가 180 MPa이고 균열 보수 락의 인장강도가 48 MPa이므로 균열 보수 락의 이음 효율 $\eta_{L, FEA}$ 은 26.7%이다. 균열 보수 부품의 인장강도가 균열 보수 락의 인장강도보다 더 커 전자가 후자보다 더 빨리 해당 재료의 인장강도에 도달하기 때문이다. 따라서 균열 보수 모델이 균열 보수 락보다 먼저 파손되어지고 균열 보수 락은 안전하게 유지되므로 냉간 기계적 이음 결합의 가장 기본 원칙인 체결 구조물이 체결도구보다 먼저 파손된다는 것을 지키고 있다. 이상의 결과를 토대로 균열 보수 락을 이용하여 파손된 기계 구조물을 체결하여 균열을 보수하는 방법이 역학적으로 확립되어졌다고 할 수 있다.

Table 5는 Prestwich^[13]와 Maric^[14]등이 수행한 회주철의 용접

과 균열 보수 락에 의한 이음효율을 나타낸 것이다. 회주철의 이음 효율이열간 용접 이음의 경우 90%에서 98%까지의 범위에 있고 냉간 용접 이음의 경우 0%에서 31%까지의 범위에 있다. 특히, 회주철의 냉간 용접이음의 경우 평균 이음효율이 19.8%로서 이음 효율이 0%인 경우는 용접영역에 용접 균열이 다수 발생하였다. 따라서 회주철의 경우 열간 용접으로는 구조 강도의 신뢰성을 충분히 확보할 수 있으나 냉간 용접으로는 구조 강도의 신뢰성을 확보할 수 없다. 한편, 회주철의 균열 보수 락에 의하여 실험적으로 최적화된 평균이음효율은 30%정도로서 냉간용접이음에 비하여 52%정도 더 크다. 즉, 회주철에서 발생된 균열은 열간 보수용접으로 수행하는 것이 바람직하나 회주철 구조물이 열간 용접이음이 불가능한 현장의 경우(대형 정치형 구조물이나 화학 약품 취급 장소등) 균열 보수 락으로 보수하는 것이 바람직하다고 생각된다.

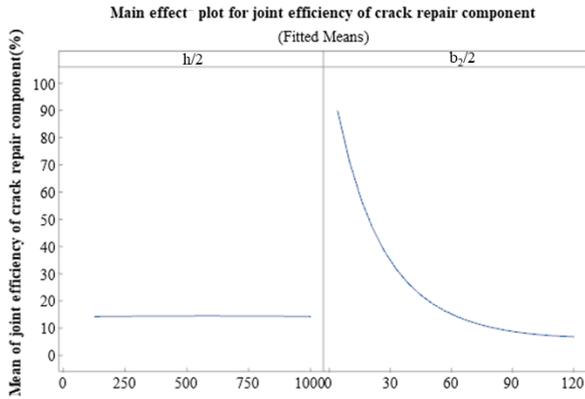
3.6 균열 보수 모델의 이음 효율 최적화

균열 보수 모델의 이음 효율을 해석적으로 최적화하기 위하여 실험계획법 중 반응 표면 방법(response surface methodology, RSM)의 중심합성계획법^[15]을 이용하였다. Table 6은 균열 보수 모델의 설계변수와 제한조건 및 목적함수를 나타내었다.

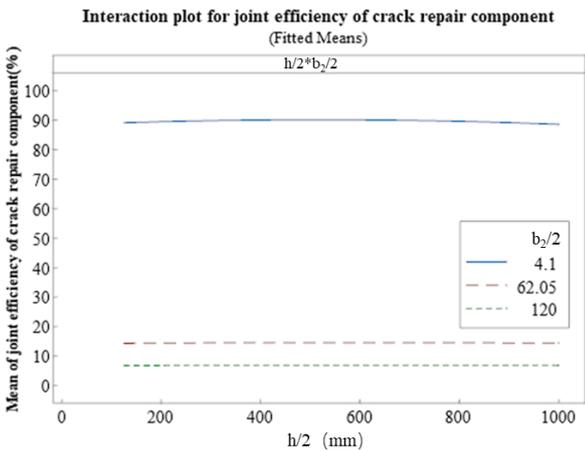
균열 보수 모델의 설계 변수는 Fig. 3과 9에서 제안한 균열 보수 모델 치수 인자인 균열 보수 모델 폭 $b_2/2$ (=균열 보수 락 간격의 1/2)과 균열 보수 모델 높이 $h/2$ 로 선정하였으며 해당 변수 중 $h/2$ 의 제한조건은 균열 보수 모델의 치수 영향이 나타나지 않는 영역을 기초로 최소 125 mm 이상을 선정하였다. 균열 보수 모델의 이음 효율을 최적화하기 위한 목적함수로 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율로 선정하였다. 각 설계변수에 대한 통계 적 실험 조건은 MINITAB R19의 중심합성계획법을 이용하여 생성시켰

Table 6 Design formulation for crack repair model

Design variable	Constraint condition	Objective function	
$h/2$	$125 \leq h/2 \leq 1000$	JEC	Maximization
$b_2/2$	$4.1 \leq b_2/2 \leq 120$	JEL	



(a) Main effect



(b) Interactions

Fig. 15 Main effect and interaction plots for the joint efficiency of a crack repair component using central composite design (CCD) model

다. 본 연구에서는 각 설계 변수에 대한 반응표면에 대한 유의 수준을 일반적 유의 수준 0.05이하로 설정한다. 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율에 대한 반응표면을 full quadratic 회귀식으로 회귀시켰을 때 $b_2/2$ 와 $(b_2/2 \times b_2/2)$ 의 설계변수만 P값이 0로 0.05이하의 값이고 $h/2$ 와 $(h/2 \times h/2)$ 설계 변수의 P값은 0.938과 0.176로 0.05이상인 되어져 통계적 유의성을 가지는 설계변수는 $b_2/2$ 이다.

Fig. 15은 각 설계변수의 주효과와 교호작용을 나타낸 것으로 $b_2/2$ 와 $(b_2/2 \times b_2/2)$ 설계변수의 경우 각 설계변수의 변화에 대하여 목적함수의 변화를 관찰할 수 있으나 $h/2$ 와 $(h/2 \times h/2)$ 설계 변수의 경우 각 설계변수의 변화에 대하여 목적함수의 변화를 관찰할 수 없었다. 따라서 $b_2/2$ 와 $(b_2/2 \times b_2/2)$ 의 설계변수만이 균열 보수 부

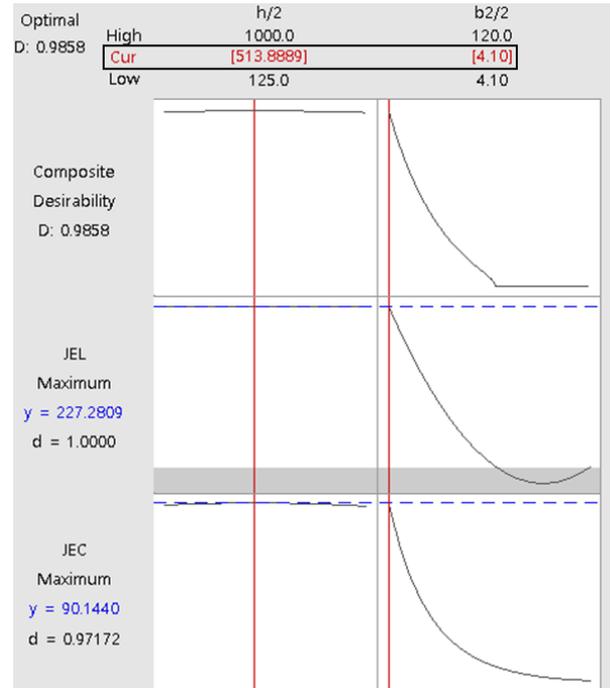


Fig. 16 Optimization result for the joint efficiency of crack repair model

품과 균열 보수 락의 이음효율을 조절할 수 있는 설계변수이다. 특히, $b_2/2$ 의 치수가 증가되면 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율이 급격히 감소되어지고 있다. 이상의 결과를 기초로 full quadratic 반응표면인 설계변수로 $b_2/2$ 와 $(b_2/2 \times b_2/2)$ 를 선정하여 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율에 대한 반응표면회귀식을 구축한 결과 다음 식 (4)와 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\ln(\text{JEC}) = 4.66079 - 0.041892(b_2/2) + 0.000159(b_2/2 \times b_2/2) \quad (4)$$

$$\ln(\text{JEL}) = 5.696 - 0.06715b_2 + 0.000306(b_2/2 \times b_2/2) \quad (5)$$

Fig. 16은 Minitab 19의 통계 소프트웨어에서 제공하는 호감도 함수를 이용한 반응표면 최적화 도구를 이용하여 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율에 대한 최적화 결과를 나타낸 것이다. $b_2/2$ 의 치수가 감소되면 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율이 급격히 증가하고 있으며 최대값은 $b_2/2$ 이 4.1 mm일 때 90%와 227%가 된다. 따라서 균열 보수 모델의 이음효율이 90%가 되어져 일반 강제 용접재의 평균이음효율(=95%)에 대하여 94.7%의 이음효율을 보이고 있으며 주철 냉간 용접재의 평균이음효율(=19.8%)에 비하여 454%이상의 매우 우수한 이음효율을 보이고 있다. 그러나 Niklas^[16]등의 균열 보수 락을 이용한 균열 보수 부품

의 현장구조강도시험결과에 의하면 균열 보수 부품의 이음효율이 17.7%에서 30%까지의 분포를 보이고 있어 현장균열 보수 부품의 이음효율은 구조최적화 결과인 90%에 비하여 19.6%와 33%정도의 지나지 않는다. 이러한 결과는 현장 균열 보수 락 배치 간격을 지나치게 좁게 하면 균열 보수 락 시트 자리를 가공하는 어려움이 발생하기 때문이다. 따라서 균열이 발생된 부품을 균열 보수 락으로 수리하는 경우 되도록이면 현장 조건에 맞추어 균열 보수 락 간격을 좁게 하는 것이 균열 보수 부품의 이음효율을 증가시키는 데 도움이 된다. 한편, 균열 보수 락의 이음효율이 227%이라는 것은 균열 보수 락이 배치되지 않는 균열 보수 부품의 부담 하중이 균열보수 락의 부담하중보다 2.7배 이상이 되는 것을 의미한다. 따라서 3.4절의 균열 보수 모델의 구조강도시험에서도 볼 수 있는 것처럼 균열 보수 부품이 먼저 파손되거나 균열 보수 락은 파손되지 않는 체결 구조체의 구조 안전성을 가지고 있다. 본 연구에서 제안한 균열 보수 모델은 부품 체결부가 먼저 파손되거나 부품 체결도가 파손되지 않는 기본적 체결 도구로서의 역학적 원칙을 지키고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대형 주철 부품의 균열 보수 방법으로 재파괴가 자주 발생하는 기존의 냉각 보수 용접 방법을 대체하기 위하여 균열 보수 부품과 균열 보수 락을 이용하여 균열이 발생된 대형 주철 구조물의 구조 건전성을 확보하는 방법을 제안하였다.

균열 보수 부품에 발생하는 최대주응력이 유한요소모델 치수에 영향을 적게 나타나는 영역이 존재하고 있으며 해당 모델의 폭에 대한 높이의 비가 0.95였다. 이러한 치수를 이용한 균열 보수 모델은 탄소성유한요소해석과 구조강도시험 결과 공칭인장강도를 각각 24.8 MPa과 26 MPa을 보이고 있어 구조강도시험에 대한 구조해석의 오차가 4.8%이다. 따라서 본 연구에서 제안한 균열 보수 모델에 대한 구조해석모델은 충분한 공학적 신뢰성을 가지고 있다. 균열 보수 모델에서 모델 높이와 폭을 설계변수로 하여 균열 보수 부품과 균열 보수 락의 이음효율에 대한 구조 최적화를 수행한 결과 균열보수부품과 균열 보수 락의 이음 효율이 각각 90%와 227%로 주철 냉각 용접재의 평균이음효율(=19.8%)에 비하여 454%이상의 매우 우수한 이음효율을 보이고 있다. 그러나 균열 보수 락을 이용한 균열 보수 부품의 현장구조강도시험결과에 의하면 균열 보수 부품의 이음효율이 17.7%에서 30%까지의 분포를 보이고 있다. 이러한 결과는 균열 보수 락 시트 자리의 현실적인 가공 제약으로 인한 넓은 균열 보수 락 배치 간격 때문이다. 따라서 균열이 발생된 부품을 균열 보수 락으로 수리하는 경우 현장 조건에 맞추어 되도록이면 균열 보수 락 간격을 좁게 하는 것이 균열 보수 부품

의 이음효율을 증가시키는 데 도움이 된다.

References

- [1] Kim, J. S., Lee, S. G., Park, H. B., Jin, T. E., Kang, S. S., 2009, Investigation on the Effect of Internal Repair Welding Variables on PWSCC of Dissimilar Welds on Pressurizer Safety/Relief Nozzle, Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meeting, 270-275.
- [2] Hong, S. J., Hong, S. H., 2005, The Status of Repair Welding for Power Plant, Journal of KWS, 23:1 26-29.
- [3] American Welding Society., n.d., viewed 10 May 2019, AWS: Standard Welding Procedure Specifications, <<https://www.aws.org/standards/page/standard-welding-procedure-specifications-swps>>.
- [4] Wu, Z. R., 2000, Machinery Repair Technology, China Communications Press, Beijing.
- [5] CB, 1995, Technical Requirements for Metal Buckle Repair of Marine Cast Iron Parts, CB/T 3730, Shanghai.
- [6] Wankar, A., Bayas, J., Mishra, H., 2016, Relation between Hole Diameter to Width Ratio & SCF of Rectangular Plate Having Central Circular Hole, IJARIE, 2:2 129-138.
- [7] Deust., 2012, viewed 12 Sep. 2019, Behavior of Contact (In ANSYS), <<https://deust.wordpress.com/2012/01/02/behavior-of-contact-in-ansys/>>.
- [8] Autio, A., 2011, Analysis of Strains in Cast Iron Joints Using FE-Simulations and Digital Image Correlation Techniques, Mater'thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [9] Jeff Gardiner., 2017, viewed 12 Sep. 2019, Finite Element Analysis Convergence and Mesh Independence, <<https://www.xceed-eng.com/finite-element-analysis-convergence-and-mesh-independence/>>.
- [10] EngMorph., n.d., viewed 12 Sep. 2019, Finite Element Method/Analysis, <<https://www.engmorph.com/skewness-finite-elemnt>>.
- [11] KS, 2007, Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials, KS B 0801:2007, Korean Standards Association, Seoul.
- [12] Jeong, S. M., 1984, Design of Machine Elements, Dong Myeong Publishing, Busan.
- [13] Ramon Prestwich, 1968, Electric Arc Welding of Gray Iron Without Preheating, Mater'thesis, Brigham Young University, United States.
- [14] Marić, D., Duspara, M., Cumin, J., Samardžić, I., 2018,

Metallock Crack Sanation, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 97:1 2557-2562, <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2155-y>.

- [15] Kim, Y. S., Kim, S. H., 2019, Optimization of Deodeok (Codonopsis lanceolata) Extraction Condition Using Response Surface Methodology, *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 48:4 447-455, <https://doi.org/10.3746/jkfn.2019.48.4.447>.
- [16] Eurs, N., 2013, Metal Stitch Reconditioning Analysis, Bachelor's thesis, Novia University of Applied Sciences, Finland.



Yuan Chen

Ph.D. Candidate in the Department of Mechanical-Computer-Industrial Engineering, Graduate School, Kangwon National University. His research interest is Mechanical Behavior of Materials.
E-mail: cy123@kangwon.ac.kr



Seok Swoo Cho

Professor in the Division of Mechanical Design Engineering, Kangwon National University. His research interest is Mechanical Behavior of Materials.
E-mail: sscho394@kangwon.ac.kr