

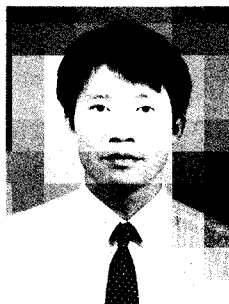
# 냉간기계적보수기술



이 상 울

(비파괴시험실 선임연구원)

- '91. 8-현재 한국기계연구소 선임연구원
- '88. 10-'91. 7 Metalock Corporation, Manager
- '88. 1-'88. 10 Illinois Institute of Technology, 연구원
- '81. 8-'87. 12 Illinois Institute of Technology, 박사
- '77. 3-'81. 2 고려대학교, 학사



이 주 석

(비파괴시험실 책임연구원)

- '77-현재 한국기계연구소 비파괴시험실
- '87. 2 부산수산대 석사
- '77. 2 서울공대 학사

## 1. 머리말

전반적인 산업의 발달 과정에서 각종 장치산업설비의 다양화 및 대형화가 이루어지고 있으며 사용조건도 더욱 가혹화되어가고 있다. 이와 비례하여 설비의 재료 및 제조상의 결함, 설계상의 문제점, 운전부주의 그리고 보수관리 미흡 등에 의하여 각종 설비가 파손되는 경우가 점점 늘어나고 있고 이로인한 직접적인 경제적 문제는 물론 간접적으로는 큰 인명피해로 인한 심각한 문제가 대두되기 시작하였다. 국내에서도 설비의 노후화가 문제시되기 시작하였으며 최근에 발생한 화학공장, 정유공장에서의 안전사고가 이를 증명하고 있다. 그러므로 각종 산업설비의 안전관리 및 진단기술은 물론 효율적이고 진보된 보수기술이 필요시 되고있다.

각종설비의 파손보수시 지금까지는 대부분의 경우 용접보수방법에 의존하고 있으나 주철, 고탄소강이나 고합금강과 같은 용접이 어려운 재질의 설비나 용접보수 전후에 필요한 열처리상의 문제점이 큰 대형설비의 경우 용접보수의 성공율은 극히 저조하고 과도한 보수경비 및 보수기간의 장기화 등으로 비효율적인 경우가 많다. 따라서 이러한 용접보수기술이 갖고 있는 취약점을 보완할 수 있는 효율적이고 경제적인 보수기술이 필요하게 되었다.

이에 본고에서는 열을 사용하지 않고 기계적인 접합(Fusionless Mechanical Joining) 원리를 이용하는 냉간기계적보수(Cold Mechanical Repair, CMR)기술을 소개하고, 몇가지 응용예를 설명하고, 냉간기계적보수 기술의 국내 정착화에 대한 제의를 하고자 한다.

## 2. 냉간기계적보수 기술

### 2.1. 냉간기계적보수 기술의 역사

냉간기계적보수 기술은 1936년 미국에서 처음으로 Lawrence Sockt이라는 사람에 의해 개발되어 "Metallock Casting Repair System"이라 명칭되었고 미국 전역에 걸쳐 Franchise 형식으로 보급되었다 [1].

그후 냉간기계적보수 기술은 각지역별 특수 산업과 관련되어 설비보수에 사용되었고, 미국남부지역에서는 정유 관련설비 및, 사탕수수재배관련 기기 보수에 사용된 기록이 있으며 [2], 1946년 Buffalo AIME Meeting에서 냉간기계적보수 기술이 정식으로 소개된 후 미국 중·동부의 제철·제강 산업관련 설비보수에 사용되었다 [3]. 그후 이 기술은 그 응용영역을 점차 확산해 발전분야의 Turbine Casing 보수 [4, 5, 6], 광산분야의 Crusher 및 관련설비보수 [7] 등에 이용되었다.

그후 광범위한 현장응용 및 시험 [11, 12]과 Finite Element Method를 이용한 응력해석을 통한 진보된 냉간기계적 보수기술 개발 및 진보된 보수재료의 개발을 통해 운전조건이 가혹한 High Pressure Turbine Casing과 같은 설비의 보수까지 가능하게 되었다 [8, 9, 10].

### 2.2. 냉간기계적보수 공정 및 보수요소

냉간기계적보수 공정은 그림 1에 요약되어 있으며, 크게 3가지 종류의 보수요소(repair component)

를 혼합사용 한다.

보수공정은 그림에서 보여주는바와같이 파손된 설비의 균열(crack) 선에 공기정(pneumatic chisel)을 사용하여 각구멍을 연결시켜서 주입하고저하는 보수요소중의 하나인 Metallock 모양을 형성한후 공기해머(pneumatic hammer)를 이용하여 metallock component를 주입시킨후 Metallock component가 설치된 주위부분을 표면경화(surface peening) 한 뒤 연마끝처리(grinding-finish)를 시행한다. Metallock component는 가공성(formability)이 우수하기 때문에 모재와 완전밀착이 이루어지고, 또 우수한 가공경화(work hardenability)를 통하여 파손된 모재에 부하수행능력을 재공급한다.

Metallock componet의 사이에 주입시키는 Metalace라는 보수요소는 압력용기와 같은 설비의 보수에서와 같이 균열된 부분의 유체나 기체의 누설방지가 필요시되는 경우에 특히 중요한 역할을 하게된다.

Metalace component는 서로 중복되게 주입설치되며 Metallock component와 같이 표면경화(surface peening)를 통하여 모재와 완전 밀착, 누설방지 작용을 하게된다.

또하나의 중요한 보수요소로써 Masterlock component가 있는데 모양에 따라서 Masterlock, Preloaded Masterlock, Keylock 등으로 나뉘어진다. 이러한 Masterlock들의 공통적인 기능은 우선 Metallock에 비해 규모가 크고, 주입설치시 가공성(deformability)이 중요하지 않기 때문에 초경합금 등과 같은 매우 강한 재질로 구성되어 보수후 균열된 모재의 강도회복에 Metallock에 비해 큰 역할을 한다는

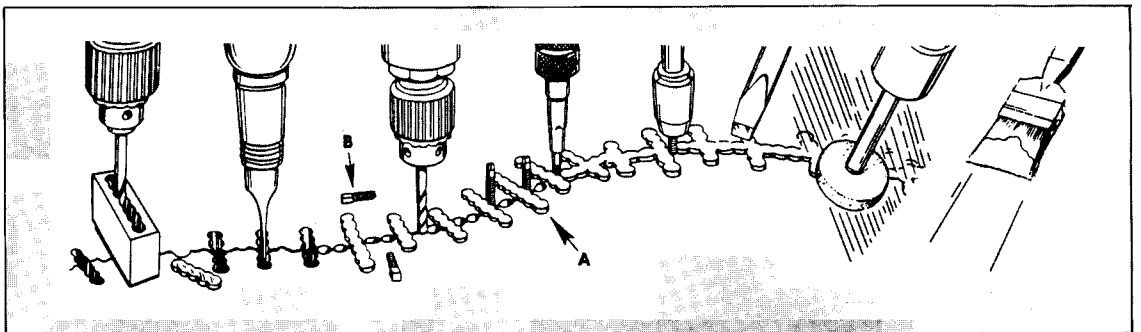


그림 1) Metallock과 Metalace 보수요소를 이용한 냉간기계적보수공정 개략도 [14]; A: metallock B: Metalace

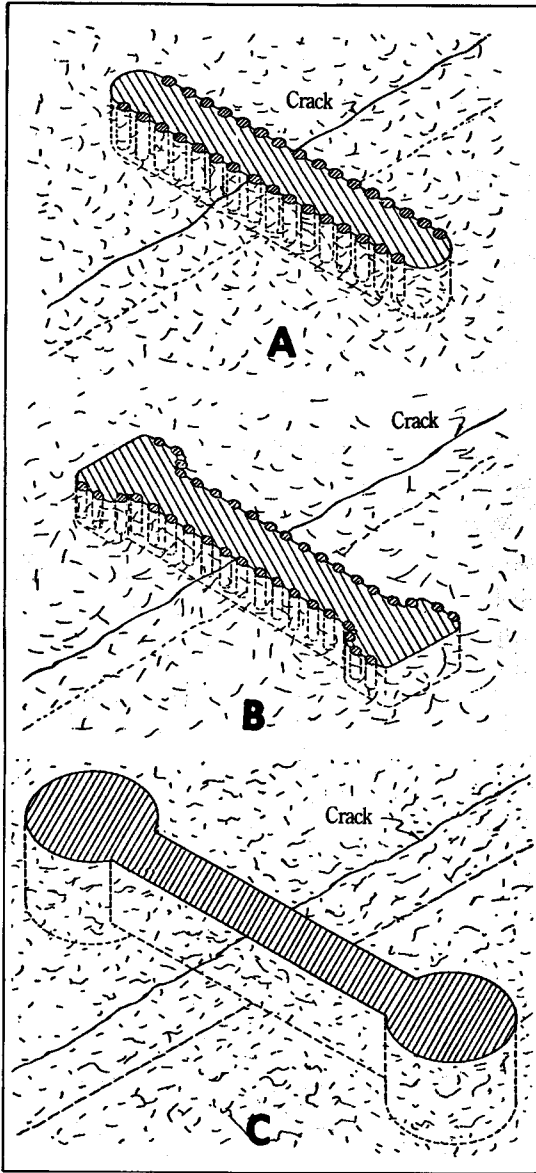


그림 2) Masterlock 보수요소의 종류[16]: A) masterlock B) pre-loaded masterlock C) keylock

점이다. 또한 Masterlock은 설치후 작용응력의 재분배 및 응력집중분산의 기능도 있다. 그림2에서는 여러종류의 Masterlock 들을 보여주고 있으며, 각각의 요소들은 외형적차이외에 설치방법에서 차이를 갖고있다. 그림2A에서 보는 바와 같이 Masterlock의 경우, 양옆면에서 Pinning을 이용하여 설치하고, 그림2C에서 보여주는 Keylock의 경우 Pin-

ning을 하지않고 가열을 시킨후 팽창된 Keylock을 설치, 냉각시 수축현상을 이용하여 설치한다. Keylock은 설치후 수축하려는 현상으로인해 보수부분에 압축잔류응력을 형성하게 되며 Keylock 자체의 보수강도 (repair strength)에 압축 잔류응력까지 더해지게되는 이중효과를 거둘수 있어 Keylock은 높은 온도에서 사용되는 high pressure turbine casing 보수에 유효히 사용되고 있다[8]. 그림2 B의 Preloaded Masterlock은 설치방법이 Marteslock과 Keylock의 중간이라 볼 수있다.

이 밖에 여러 보수 전문 회사에서 다양한 보수조건에 맞추어 여러종류의 보수요소들이 개발되어 있고, 그 예로서는 Tielock, Metahelix, Tiebolt, Anglelock, Lock-N-Stictch 등이있다[10, 13, 14].

보수요소로 사용되는 재질은 주철로 만들어진 설비의 보수에 많이 사용되는 Invar-type고 Ni강에서, 스테인레스강, 고온 고압 설비에 많이 사용되는 Ni이나 Co계의 Superalloy까지 그 범위가 매우 넓으며, 특히 Masterlock의 경우 열처리를 이용하여 강도의 변화를 주는 방법도 널리 사용되고 있다. 보수요소재료 선정은 보수설계에 있어서 중요한 변수이며 올바른 재료의 선정이 냉간기계적보수의 성공 여부에 큰 영향을 미친다.

### 2.3. 냉간기계적보수 절차

그림3에서 냉간기계적보수 절차를 보여주고 있다. 후에 재론되겠지만 현재 냉간기계적보수 기술이 가지고 있는 문제점 중의 하나가 과학적이고 논리적인 기술의 응용이 아닌 지나친 상업화에 의한 주먹구구식 응용이다. 냉간기계적보수 기술의 효율성의 극대화와 보수 성공을 향상 그리고 용접보수 기술과 같은 수준의 표준화를 이루기 위하여서는 그림3에 제시된것처럼 논리적인 절차를 따라서 시행, 기술의 과학적응용과 체계적인 Database System을 구성하여 기술의 표준화를 꾀하여야 할것이다.

파손된 설비를 보수하기위해서는 우선 여러가지 비파괴적 검사방법을 사용하여 예를들면 육안검사, 액체침투탐상시험, 초음파탐상시험, 자분탐상시험, 방사선투과시험, 파손, 특히 균열의 위치, 길이,

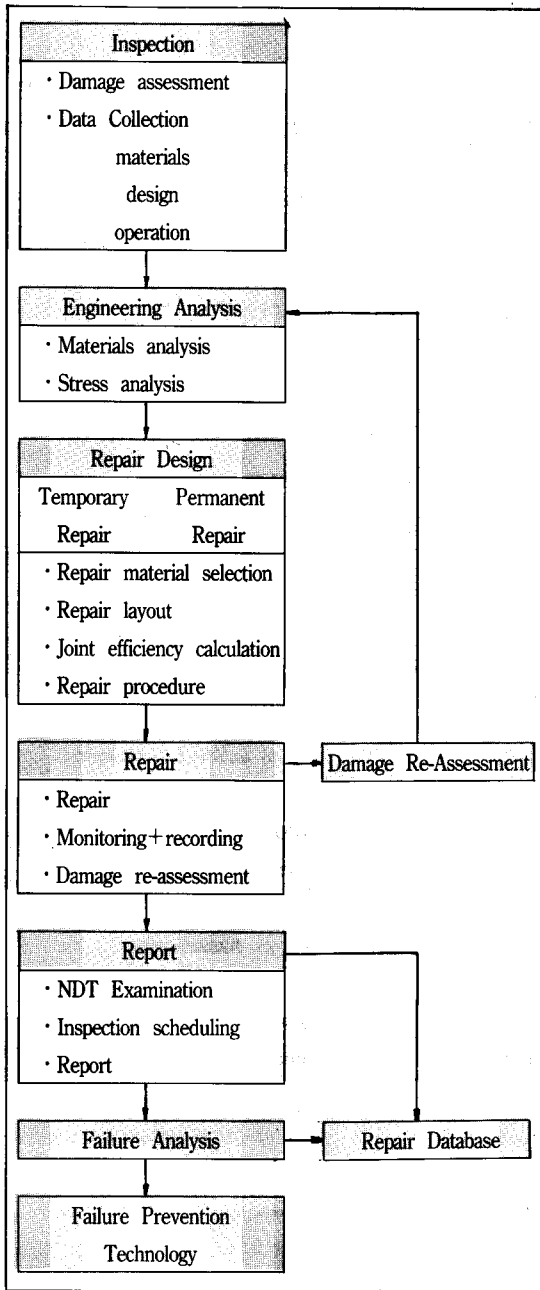


그림 3) 냉간기계적보수 적용 절차

깊이등을 정확히 파악하고 보수설계에 필요한 예상되는 파손원인, 설비관련자료(재질, 설계도, 운전조건등)를 정확하게 수집한다.

이러한 자료를 바탕으로 필요한 경우에 설비 재질에 대한 분석및 시험을 실시하고 운전시 응

력분포를 해석하여 보수설계를 하게된다.

Finite Element Method에 의한 운전시 응력분포상태 분석을 통한 Turbine Casing의 보수는[8] 이러한 논리적이고 과학적인 냉간기계적보수기술의 좋은 응용예라 할 수있다.

다음으로 보수설계과정으로 이과정에서 보수요소설정, 보수요소의 배치, joint efficiency 계산, 그리고 보수공정절차를 설정해야 한다. 그러나 이에 앞서 선행되어야 할것은 보수후 설비의 기대수명, 보수경비, 교체가능여부 그리고 보수기간등을 고려하여 임시보수 또는 영구보수의 방향을 결정해야 한다. 보수설계가 완성되면 보수시행을 하게되는데 이때에는 각 설계공정을 철저히 준수해야하며 보수시행시 설비의 균열에 대해 비파괴검사시보다 정확한 정보를 얻을 수 있으므로 균열의 정도를 재평가하여 처음의 보수설계를 수정보완할수 있도록 한다.

설비의 보수가 완공되면 보수된 부분을 비파괴검사를 이용하여 운전또는 비운전시 보수로인한 결함발생 여부를 확인하고 보수부분의 주기적 검사계획을 마련함과 동시에 보수에 관한 기록(보수설비의 종류, 보수설계, 보수기간, 보수의 성공여부)등을 남겨두어 냉간기계적보수 기술에 관한 Database를 구성 차후 유사한 보수시 이용하게 한다. 끝으로 설비의 파손원인분석을 통해 전반적인 파손방지기술 개발을 유도한다.

## 2.4. 냉간기계적보수 기술의 장단점 비교

냉간기계적보수 기술이 가지고있는 장단점을 용접보수기술과 비교하여 그림4에 요약하였다. 냉간기계적보수 기술은 열을 사용하지 않기때문에 여러가지 유리한 점이 있는데, 첫째로 용접보수시 발생하는 가열, 냉각에 의한 잔류응력 형성및 기계적 변형(distortion)이 발생하지 않고, 또 잔류응력제거를 위한 열처리 공정, 기계적변형제거를 위한 기계적 가공(machining)공정이 불필요하다. 이에따른 보수기간 단축 및 보수경비 절감의 효과가 발생된다. 또한 화기사용이 금지된 화학공장이나 정유공장에서 사용이 가능하다.

냉간기계적보수 기술	
장점	1. Fusionless Process : minimum distortion no secondary process no fire hazard 2. Locked-up stress relive + compressive residual stress 3. Joining dissimilar materials and difficult-to-weld materials 4. On-site repair : minimum repair period.
단점	1. Lack of standardization and coding system 2. Historical rule-of-thumb approach 3. Little R & D activity

그림 4) 냉간기계적보수 기술의 장단점 비교

둘째로 냉간기계적보수를 함으로써 응력집중 현상이나 Lock-up 응력을 제거할 수 있으며 보수후 보수주위표면에 압축잔류응력을 유지시킴으로써 설비의 기계적성질을 향상시킬수 있다.

세째로 용접에서는 특수한 상황 외에는 거의 불가능한 이종금속간 보수가 용이하고 주철, 고탄소강, 고합금강과 같은 용접보수가 난이한 합금의 보수가 용이하다. 특히 주철로 제조된 설비의 경우 냉간기계적 보수의 성공율은 거의 100%에 가깝다. 네째로, 생산성과 직결되는 보수기간이 짧다는 장점이 있는데, 특히 대형설비의 경우 분리, 운반, 조립 따위의 이차적인 보수공정에 필요한 보수기간을 현장보수를 통해 극소화시켜 Process down time에 의한 경제적손실을 최소화 할 수 있다.

냉간기계적 보수기술이 가지고 있는 취약점을 보면, 장기간 사용되어 왔음에도 불구하고 용접 보수기술과 같은 표준화 그리고 규격화가 되지 못하고, 냉간기계적기술이 현장응용을 통해 많은 시행착오를 거쳐 각 업체 내의 "Know-How"로 남아있어, 전반적 기술개발및 발전이 부족하다는 점이다. 특히 이 기술의 강한 상업적 성격으로 경쟁사들 사이의 기술정보 교환이 거의 전무한 실정이다. 또한 냉간기계적 보수기술이 연구개발및 표준화를 시행할만한 미국용접학회(AWS)와 같은 비영리기관의 부재등을 지적할 수 있다.

## 2.5. 응용분야 및 응용예

냉간기계적 보수 기술은 거의 모든 산업분야에서의 설비보수에 사용되어 왔으며 보수된 설비의 종류는 작게는 작은 Gear Box부터 크게는 Turbine Casing, Mill Stand 등 그 응용분야는 광범위하다. 냉간기계적보수기술이 사용된 대표적인 산업분야 및 보수된 설비의 예를 그림5에 표시하였다. 이에 나열된 설비외에도 향후 2000년대 까지 과학적 연구개발을 통한 냉간기계적보수기술의 발전으로 사용조건이 가혹한 항공분야까지의 확대응용을 기대하면서 몇가지 응용예를 들고자 한다.

Industries	Equipments
MANUFACTURING :	press frames, gears, rams, shears, extrusion presses, headers
STEEL :	mill stands, bearing pedestals, roll grinders, gear boxes, cylinders, tunpish covers
UTILITIES :	steam turbine casings, hydro turbine runners, bowl mills, pumps, compressors, valves, water boxes
OIL & GAS REFINING :	compressor cylinders, pump casings, gear boxes, engine frames, turbine casings
MINNG :	crushers, ball mill heads, trunions, gears, kilns
PULP & PAPER :	turbine casings, compressors, pumps, kilns, dryers, clarifiers
GAS TRANSMISSION :	engine frames, compressor cylinders
MARINE :	turbine casings, engine frames, gear boxes
WATER TREATMENT :	clarifiers, compressor frames, pump casings

그림 5) 냉간기계적보수기술의 응용산업분야 및 응용산업 기기

### 2.5.1. 기어

기어의 파손은 크게 두가지로 나눌수 있는데

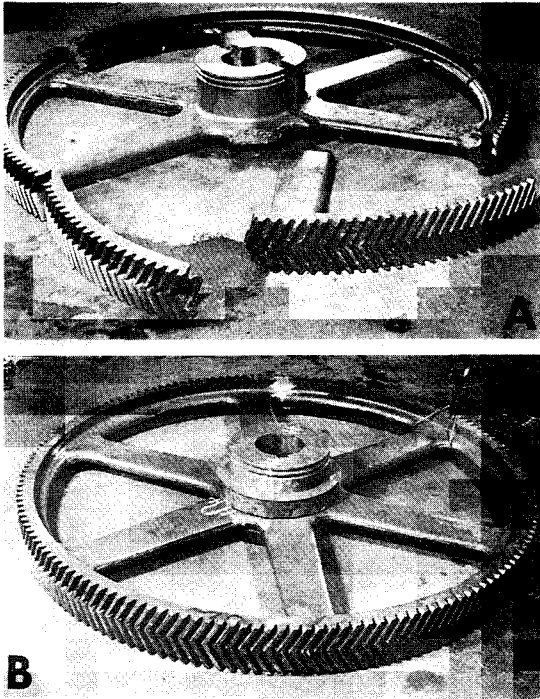


그림 6) Overloading에 의해 파손된 Herringbone 기어의 냉간기계적 보수예.[15]

그림6A에서 보는 바와같이 overloading 이나 jamming등에 의해 여러조각으로 파손되는 경우와 그림7A에서 보는바와같이 기어이빨의 마모로인한 파손의 두가지 경우가 있다. 이러한 기어의 손상을 그림6B와 그림7B에서 보여주는 것과 같이 냉간기계적 보수하였다. 특히 그림6B에서 보여주는 Herringbone 기어를 냉간기계적 보수한후 이차적 machining 과정을 행하지 않은 상태에서 기어작동의 필수인 dimensional tolerance를 유지 정상화할 수 있었다.

또한 그림7A의 경우처럼 대형기어의 기어 이빨이 파손된 경우 기어의 분리없이 현장에서 파손된 부분만을 국부제한뒤 새로운 이빨을 제조, 냉간기계적 보수 방법으로 보수하였다. 특히 기어가 대형일수록 이러한 방법은 그효과가 크다할 수 있는데, 파손된 기어를 교체하고자 할경우 기어자체 가격이 고가이고 기어의 제조 납품기간이 적어도 6~12개월이 걸리므로 생산성에 큰 저해를 초래시키는 문제가 있기 때문이다. 용접보수시 보수성공율이 저조하고, 기어의 분리, 보수, 조립의

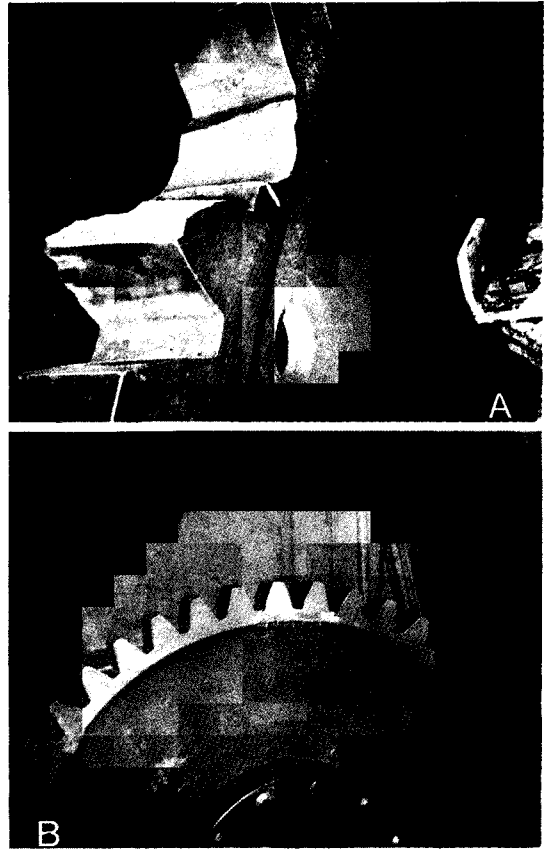


그림 7) 마모에 의한 기어의 손상보수예[14]

경우 보수공정의 장기화 문제가 수반된다.

### 2.5.2. Turbine Casing

그림8은 high pressure turbine casing의 flange 부분과 stud hole부분의 Metalock, Pre-loaded Masterlock, 그리고 Keylock을 이용한 냉간기계적보수 응용사례를 보여주고 있다.

### 2.5.3. High Pressure Pump Casing과 Compressor Cylinder

그림9에서는 모재의 불량과 corrosion pit에 의한 고압 pump casing의 누출현상에 대한 냉간기계적보수 예를 보여주고 있다. 그림9A에서 보는바와같이 결함이 여러곳에 존재하는 경우 결함부 위전체를 제거한뒤(그림9B) 제거된 부분과 동일한 부품을 만들어 설치하고(그림9C) 냉간기계적 보수방법을 이용 보수를 마친다(그림9D). 보수후

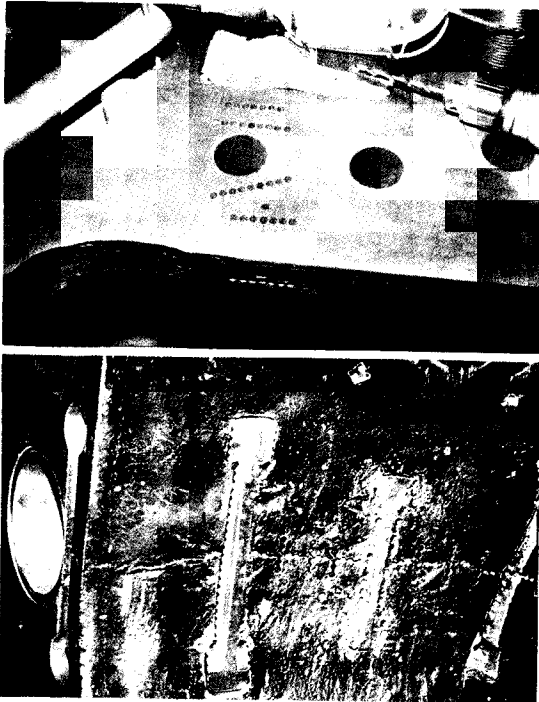


그림 8) High pressure turbine casing의 flange 부분과 stud hole 부분의 보수 응용사례 : A : matalock B : key-lock C : preloaded masterlock



그림 9) 파손된 high pressure pump casing의 보수예.[16]

비파괴검사과정에서 pump casing의 사용압력보다 1.5배의 압력(450psi)에서 leak testing을 한뒤 보수를 완료한다. 또한 이 예에서 보여주는것처럼 모재인 주철을 제거하고 저탄소강으로 부품을 제작 이중 금속간의 접합을 냉간기계적 보수기술로 용이하게 이루었다.

끝으로 Compressor Cylinder의 보수예를 그림10에서 보여주고 있다. Compressor 내면의 water jacket이 동파된 경우로써 모재가 주철일뿐 아니라 결합부근에 접근이 제한되어 있어 용접보수는 불가능하다. 이러한 경우 외부 Compressor Casing을 절단한뒤 결합부위를 완전제거, 저탄소강을 이용 대체하여 냉간기계적 보수를 이용 보수하였다.

## 2.6. 냉간기계적보수기술의 국내의 현황

국내의 이 기술의 보급상태는 아직 완전히 파악되지 못하였으며, 본고가 발표됨에 따라 국내의

연구기관 및 관심업체의 많은 feed back을 기대해본다. 미국의 경우 앞서 기술한 문제점으로 인해

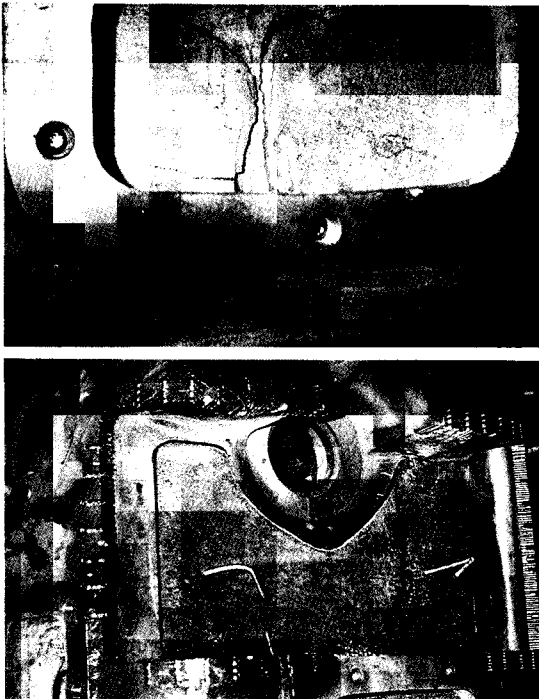


그림 10) 동파(freeze-cracking)된 내부 compressor cylinder의 보수예[16]

이 기술이 미국전역에 걸쳐 용접보수기술 처럼 공인화되지는 않은 상황이다. 하지만 각 업체에 따라 기술의 수준차이가 현저하며, 기술수준이 높은 업체의 경우, 특히 발전설비중 Turbine Casing 보수의 경우 냉간기계적보수기술에 대한 신뢰도는 매우높은 실정이다.

### 3. 냉간기계적보수기술의 국내정착화에 관한 제의

지금까지 냉간기계적보수기술을 소개, 몇가지 사용예를 설명함으로써, 이 기술이 단순한 용접보수기술의 대안으로서가 아니라 그자체가 하나의 독립적인 효과적 보수 기술임을 설명하였다. 여기서 이기술의 효과적이고 이상적인 국내정착화에 대한 제의를 하고자 한다.

우선 가장우려가 되는 것으로 1930년 냉간기계적보수기술이 처음 개발 보급된 당시처럼 주먹구구식으로 이 기술을 도입국내에 정착화를

유도해서는 안될것이다. 논리적인 engineering approach에 의한 현장응용이 아닌 지나친 상업성에 치우쳐 모방위주의 현장응용을 하게 되는 경우 진보적인 보수기술축적이나 보수기술의 표준화가 매우 어렵게 될것이다. 우선 비영리 정부출연기관에서의 기술도입및 기술축적이 선행되어야겠고 점착적인 현장응용을 통한 자연스럽고 논리적인 기술이전이 바람직하며 냉간기계적보수기술의 계속적인 연구개발이 이루어져야 하겠다.

이와더불어 보수기술응용에 관한 조직적이고 효율적인 Database 구성도 냉간기계적보수기술의 표준화를 위해 병행되어야 하겠고, 중국적으로 용접보수기술과 병행하여 종합적인 보수체계 구성을 유도하여야겠다.

### 4. 맺음말

지금까지 냉간기계적보수기술을 소개하고 몇가지 응용예를 설명하였다. 이 기술이 모든 설비를 보수할수 있는 Cure-all 보수기술은 아니지만 용접보수기술이 지니지못한 특수한 장점을 가지고 있으며, 효과적이고 경제적인 보수기술임에는 틀림이 없다하겠다. 그러므로 이러한 기술을 국내 정착화함에 있어서 외국의 경우를 답습하지 않고 기술의 논리적이고 과학적이해, 점진적 현장응용을 통한 단계적 국내정착화를 유도함으로써 향후 산업설비보수기술의 새로운 장을 열기를 바라며 끝으로 정부차원에서 이분야에 많은 지원을 바라고, 이기술에 대한 관련 연구기관 및 학계의 많은 관심을 바라마지 않으며 미국 Metalock Corporation의 자료제공에 감사하며 이 글을 마친다.

### 참 고 문 헌

- [1] Editor, Diesel Power, April 1957
- [2] Editor, Sunday Advocate, Baton Rouge, La., pp. 3-I, October 29, 1978
- [3] Rectenwald, R. L., Iron and Steel Engineer, pp. 76-81, May 1949
- [4] St. John, E. D., Power Plant Engineering, Mach 1946



- [5] Papamarcos, J., Power Engineering, Vol. 87, No. 3, pp. 55-57., March 1983
- [6] Exciter, Exiter Magazine, May 1975
- [7] Gustafson, C. A., Rock Products, Vol. 55., No. 11, pp. 89-90, Nov. 1952
- [8] Rasmussen, D. M. and Durbin, W. T., ASME 84-JPGC-Pwr-44, 1984
- [9] Rasmussen, D. M., Power, pp. 75-79, September 1986
- [10] Engineered Mechanical Service, Inc., Technical Brocher, 1979
- [11] Roos, H. D., Engineering Supplement, August 1954
- [12] Watson, T. A. and Shields, B. M., United State Steel Corporation A-1271-M.S., June 1961
- [13] Lock-N-Stitch, Inc., Technical Description
- [14] In-Place Machining, Inc., Technical Brocher
- [15] Metal Locking Service, Inc., Technical Brocher
- [16] Metalock Corporation, Technical Brocher