

## 特輯 : 용접 잔류응력에 관한 공학적 접근

# MSR을 이용한 용접잔류응력의 제거와 적용성 검토

박 지 선 · 한 명 수 · 한 중 만

## Mechanical Stress Relief Technology and its Application

Ji-Sun Park, Myung-Soo Han and Jong-Man Han



박지선 / 대우중공업  
(주) 선박해양기술연  
구소 / 1968년생 / 용  
접변형 및 열응력해석



한명수 / 대우중공업  
(주) 선박해양기술연  
구소 / 1963년생 / 피  
로파괴 및 강도해석



한중만 / 대우중공업  
(주) 선박해양기술연  
구소 / 1956년생 / 소  
재개발 및 용접아금

### 1. 서 론

일반적으로 용접현상은 국부적으로 급열·급냉 과정을 동반하기 때문에 용접구조물에는 용접으로 인한 변형 및 잔류응력이 필연적으로 남게 된다. 용접구조물에서 국부적인 높은 인장 잔류응력은 사용 중에 받는 하중과 중첩되어 취성파괴 발생의 원인이 될 뿐만 아니라 피로강도, 부식저항 등을 저하시키는 요인이 된다<sup>1,2)</sup>. 특히 저온의 환경에서 사용되는 용접구조물의 용접부에 존재하는 용접잔류응력은 열영향부에서의 취약한 조직으로 인한 취성파괴를 유발하게 된다<sup>3)</sup>.

실제로 용접구조물의 재료에는 항상 내부 잔류응력이 존재하며 그 크기는 재료내의 내부 잔류응력간의 평형의 원리(Self-equilibrating system)에 의해 결정된다<sup>4)</sup>. 일반적인 구조 강도설계에서 행해지는 탄성해석에서는 재료 내부에 존재하는 잔류응력을 고려하지 않기 때문에 설계시에 계산된 응력이 실하중하의 구조물에서 발생하는 응력과 같다고 볼 수는 없다. 철강재료를 사용한 구조물의 경우 구조물 제작공정 전반에 걸친 성형가공 및

조립과정에 수반되어 재료 내에는 잔류응력이 발생되며 특히 용접조립에 의해 용접부 근방에서는 재료의 항복강도 수준의 상당히 큰 용접 잔류응력이 발생하게 된다.

일반적으로 용접잔류응력의 완화법으로 가장 확실한 방법은 후열처리법(Post weld heat treatment, PWHT)이지만 이 방법의 적용은 구조물의 크기에 제한을 받게 된다. 따라서 PWHT를 적용하기 어려운 구조물에 대해서는 다른 방법에 의해 용접잔류응력을 완화시켜야 하며 이 경우에 일반적인 방법으로 기계적 응력완화법(Mechanical stress relief method, MSR)이 있다.

본고에서는 MSR의 기본원리에 대하여 간단하게 정리하고 실 구조물에 대한 MSR 적용시 고려해야 할 제반사항을 위하여 단순 용접부에 대한 MSR 적용 실험결과와 실제 압력용기를 대상으로 MSR을 자체 제작된 기술절차서<sup>5)</sup>에 따라서 시행하고 MSR의 적용성에 대해서 검토하였다.

### 2. 기계적 응력완화법의 원리

용접잔류응력의 제거방법으로 널리 사용되고 있는 후열처리방법의 기본 원리는 용접잔류응력이 남아 있는 구조물에 열을 가하면 항복응력이 낮아져 잔류응력이 상대적으로 높게 분포된 부분부터 항복응력을 넘어 점차 소성변형이 발생하고, 이로 인해 다시 상온으로 냉각된 후 잔류응력이 완화되는 것이다. 이에 비해 MSR 처리는 재료의 항복응력은 변하지 않는 상태에서 외부로부터 하중을 가하여 이를 잔류응력과 중첩시켜 재료 내에서의 실제응력이 항복응력을 넘게 함으로써 소성변형을 유도하여 잔류응력을 완화시키는 것이다.

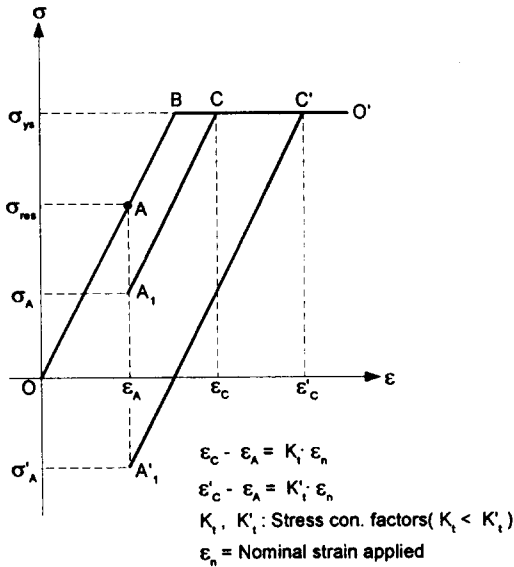


Fig. 1 Schematic stress-strain behavior before and after MSR

Fig. 1은 구조적 응력집중의 정도가 각기 다른 잔류응력을 가진 용접부에서 하중의 부하후 잔류응력이 완화되는 원리 및 그 차이를 재료의 응력-변형률 관계로 설명한 것이다. 재료는 탄성-완전소성 재료인 것으로 가정하면 그 응력-변형률 관계는 O-B-O'를 따른다. 구조적 응력집중의 정도가 각기 다른 두 용접부에서의 초기 잔류응력의 크기가  $\sigma_{res}$  (점 A)로 같다고 하면 하중부하에 따라 응력집중의 정도가 상대적으로 작은 용접부는 A-B-C의 응력-변형률 관계를 나타내는 반면 응력집중

의 정도가 상대적으로 큰 용접부에서는 A-B-C'의 응력-변형률 관계를 나타낸다. 반면에 하중을 제거하는 동안에는 모두 탄성거동을 하므로 최초의 상태인  $\epsilon_A$ 까지의 응력-변형률 관계는 직선적으로 감소하게 된다. 따라서 하중이 완전히 제거된 상태에서 용접부에 존재하는 내부응력은 구조적 응력집중이 큰 용접부에서는  $\sigma_A$ 로 되고 구조적 응력집중이 상대적으로 작은 용접부에서는  $\sigma_A$ 로 되어 최초의 잔류응력의 크기( $\sigma_{res}$ )보다 작아지게 되어 하중부하에 의해 잔류응력의 완화가 발생한다. 이것이 잔류응력이 존재하는 탄소성 재료에서의 기계적 하중부하로 인한 잔류응력 완화 원리이다.

### 3. 단순 용접부에 대한 MSR 적용 시험

실제 구조물인 압력용기에 대한 MSR 시행 시에 고려해야할 제반사항을 검토하기 위하여 단순용접부에 대한 MSR 시험을 실시하였다.

#### 3.1 실험조건

실험에 사용된 강재는 두께 10mm인 AH36급 판재이며 시편의 치수는 폭 45mm, 길이 300mm로 하였다. 시편은 MSR 효과의 검증에 잘 알 수 있도록 하기 위해 시편의 제조 및 가공과정에서 발생할 수 있는 잔류응력을 제거할 목적으로 열처리로써 이용하여 600℃에서 2시간동안 열처리를 수행하였다. 한편 MSR 전후의 잔류응력 변화와 MSR 처리의 효과를 검증하기 위해 동일한 크기와 같은 조건으로 용접한 두 개의 시편을 제작하였다. 즉 하나는 MSR이전의 잔류응력 상태를 확인하는 잔류응력 계측용이고 다른 하나는 MSR 시험을 위한 것이다. 시편용접은 FCAW로 10mm 폭의 Bead on plate 용접을 하였고 이때 사용한 용접조건은 155A, 23V와 40cpm이었다.

용접후 시편에서의 잔류응력을 계측하기 위하여 동일한 시편에 대하여 용착금속 중앙 및 Weld toe 부에서 10mm 떨어진 곳에 5mm 간격으로 3개의 Strain gage를 좌우 대칭으로 부착하였고 단면절단법으로 잔류응력을 계측하였다.

1차 하중 Cycle에서의 최대하중은 130kN이었으며 13kN씩 10단계로 최대하중까지 단계적으로 나누어 하중을 부하하였다. 최대하중에 도달한 후 2시간동안 유지시킨 후 하중부하시와 마찬가지로 단계적으로 제하시켰다. 2차 하중 Cycle에서는 최대하중이 130kN이었으며 1차 하중 Cycle에서와 마찬가지로 10단계로 나누어 하중을 부하하고 최대하중 도달후 바로 제하하였다.

### 3.2 결과 및 고찰

Fig. 2는 FCAW 시편의 MSR 처리동안 부가하중에 대한 변형률의 거동 변화를 나타낸 것이며 변형률은 용접선상에서 용접선 방향으로 측정된 것이다. 1차 하중의 부하 시에는 점진적으로 소성변형이 일어나는 비선형 거동을 나타내고 있으며, 2차 하중의 부가 및 제하시에는 탄성변형이 일어나는 선형거동을 나타내고 있다. 이러한 거동은 용접선으로부터 10mm와 20mm 떨어진 열영향부에서도 동일한 양상(구조물에서는 이와 같은 상태를 Shakedown 상태라고 한다<sup>6)</sup>)을 관찰할 수 있었다. 따라서 MSR 처리에 의해 용접잔류응력의 완화가 발생하였음을 알 수 있다.

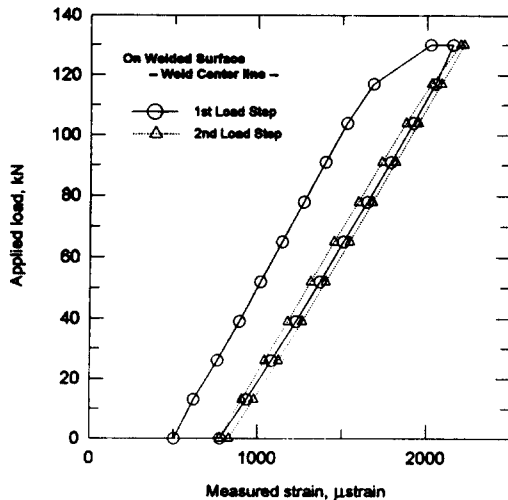


Fig. 2 Applied load-measured strain on welded surface of FCAW specimen

Fig. 3은 FCAW 시편의 MSR처리 전후의 용접잔

류응력 측정결과를 비교하여 나타낸 것이다. FCAW 시편에서 MSR 처리이전의 As-weld 시편의 잔류응력을 측정된 결과를 보면 용착금속에서는 250 MPa 정도의 인장 잔류응력이 존재하고, 용접 비이드로부터 점차 멀어짐에 따라 감소하여 시편 좌, 우의 끝단에서는 압축잔류응력이 존재하는 양상을 보여 주고 있다. MSR 시편에서는 As-weld 시편과 비교하여 용착금속에서 약 80MPa 감소한 170MPa의 잔류응력이 남아있는데, 이는 MSR로 인해 용접직후 잔류응력의 32% 정도가 감소했음을 나타낸다.

MSR 처리를 전후해서 시편 전체에 분포된 용접 잔류응력의 형태가 변화하는 것은 용착금속에서의 잔류응력의 완화로 시편 내의 힘의 평형을 이루기 위해 잔류응력이 전체적으로 재분포하기 때문이다.

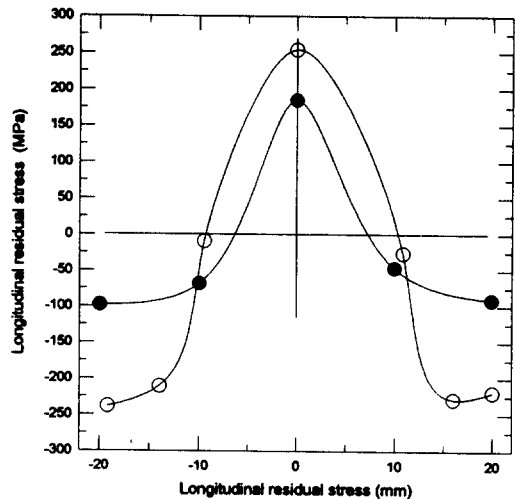


Fig. 3 Longitudinal residual stress before and after MSR in FCAW weld

### 4. 압력용기에 대한 MSR 적용실험

본 연구에서는 MSR 시행과 관련하여 IMO Gas Code<sup>7)</sup>의 요구사항 만족을 위해 자체적으로 작성된 기술절차서에 의거하여 실 압력용기를 대상으로 MSR을 시행하였다. MSR 적용시험을 행한 압력용기는 압력 저장용 Air reservoir vessel이었으며

DNV의 Class I 용기에 대한 요구사항에 준하여 설계 및 제작된 것이다. 압력용기의 설계압력이 33kg/cm<sup>2</sup> 이기 때문에 수압 시험시의 시험압력은 그 1.5배인 49.5 kg/cm<sup>2</sup>으로 되고 이것은 MSR 시험시의 시험압력에 대한 IGC의 요구사항을 만족하는 조건이다.

#### 4.1 Strain gage의 사양 및 부착위치의 결정

MSR시험에 관한 기술 절차서에 의해 압력용기에 대하여 결정된 Strain gage 부착지점과 그 일련 번호를 Fig. 4에 나타내었다. Strain gage의 부착점으로 총 7지점을 선정하였으며 Gage location No. 1은 MSR 시험중 시험압력에 의한 용기에서의 1차 일반 막응력의 계측, No.2~3은 불연속부에서의 국부응력의 계측, No.4~No.7은 불연속부에서의 Shakedown 판정 및 국부응력의 계측을 위한 지점으로 각각 결정되었다. 그림에서와 같이 Shakedown 판정을 위해 부착한 Gage의 중심은 모두 용접부의 Fusion line으로부터 길이방향으로 10mm 떨어진 위치에 부착하였다.

각 지점에 부착할 Gage의 사양을 결정하기 위하여 압력용기에 대한 구조해석 결과<sup>9)</sup>를 이용하였다. 일례로서 Fig. 5는 Gage Location No.5에 대한

Strain gage의 사양을 결정하기 위해 구조해석을 통해 부착점 근방의 각 축방향 변형률 값의 분포를 얻은 결과를 나타낸 것이다. 부착점 근방에서의 변형률의 절대값 및 변형률 분포의 변화는 시험용기의 원주방향 변형률( $\epsilon_x$ )의 길이방향(y방향)으로의 분포가 가장 크기 때문에 이 지점에 대한 Gage의 사양은  $\epsilon_x$ 의 y방향 분포선을 이용하여 결정하였다.

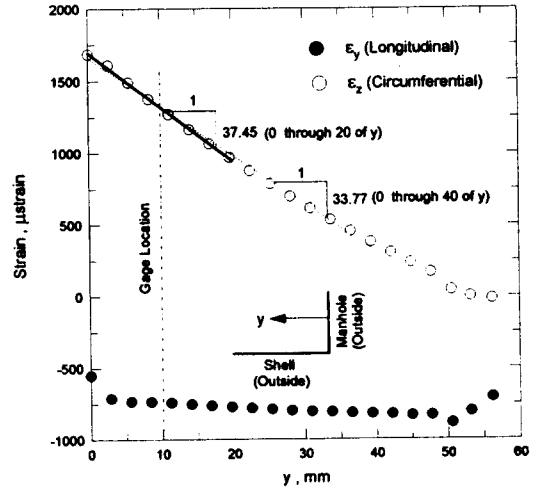


Fig. 5 Determination of strain gradient in the region of gage location No. 5

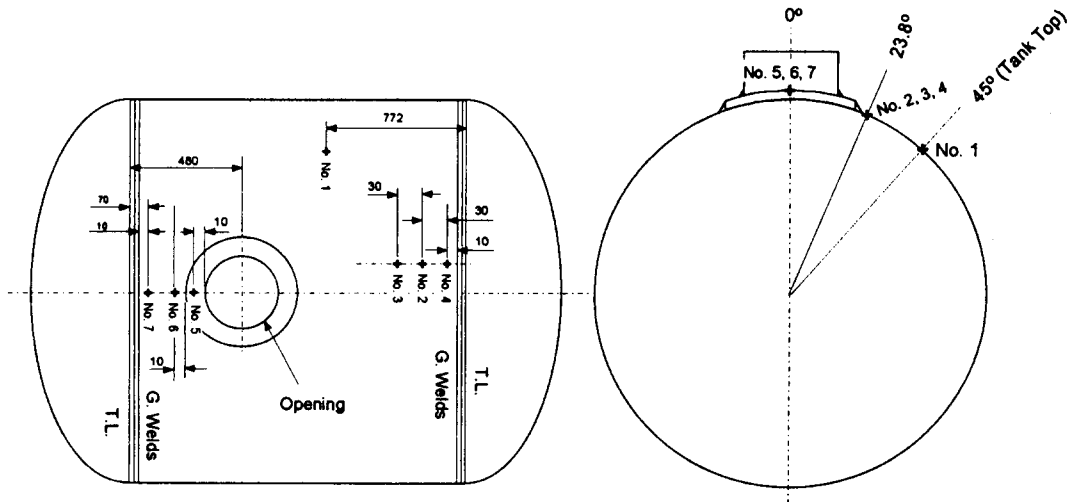


Fig. 4 Configuration of gage location on test vessel

구조해석 결과로부터 결정된 Gage location No. 5에 대한 Gage length의 최대값은 7.0 mm이었으나 구조해석 과정에서의 시험용기 형상 단순화로 인한 해석결과의 오차를 고려하여 실제 부착 Gage의 Gage length는 2mm로 결정하였다. Strain gage 부착시의 부착 방위(Orientation)는 3-element rosette gage의 경우는 2개의 gage element가 시험용기의 길이방향(Longitudinal direction, y) 및 원주방향(Circumferential direction, z)과 각각 평행하게, 1축 Gage(Gage location No. 2, 3)의 경우 길이방향과 평행하게 하였다.

#### 4.2 가압과 data acquisition 절차

Fig. 6은 MSR 시험시의 가압절차를 도식적으로 나타낸 것이다. 1차 가압시의 최고 압력은 시험용기의 수압시험 압력(설계압력의 1.5배)에 해당하는  $50 \text{ kg/cm}^2$  으로, 2차 가압시의 최고압력은 설계압력의 1.1배(IGC 요구사항)에 해당하는  $37 \text{ kg/cm}^2$  으로 각각 설정하였다. 각 가압 Cycle에서 압력은 최고압력까지 균일하게 10등분되어 순차적으로 가해졌으며 각 등분압력 단계에서 일시적으로 압력을 유지하여 Strain gage로부터의 Data를 취득하였다. 1차 가압시에는 최고압력 도달시 압력을 2시간 동안 유지하여 수압시험을 병행하였으며

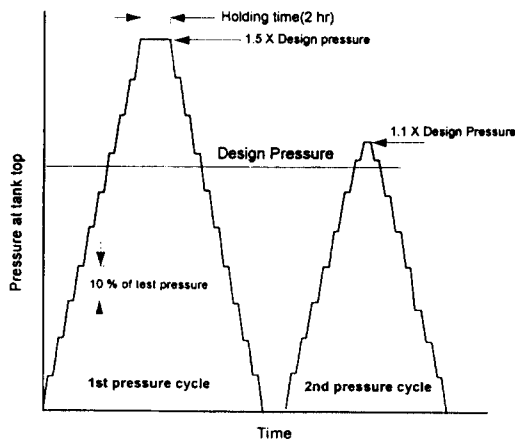


Fig. 6 Schematic diagram of pressure cycles of MSR treatment

2차 가압시에는 최고압력 도달시 Data의 취득후 유지시간없이 바로 감압을 행하였다.

MSR 시험중 시험압력에 의한 시험용기에서의 파열(Burst) 발생 방지를 위해 원통형 쉘의 평활부(Gage location No. 1)에서의 1차 응력이 IGC의 제한치를 초과하는지의 가부를 On-line으로 관찰하였다. 또한 2차 가압-감압 Cycle시의 각 Gage 부착점에서의 Shakedown 달성 여부를 판정하기 위하여 Digital display를 사용하여 얻은 1차 가압-감압 Cycle 완료후의 잔류 Strain값을 2차 가압-감압 Cycle 완료후의 Strain값과 비교하였다.

#### 4.3 결과 및 고찰

Fig. 7은 1차 및 2차 압력 Cycle에 의한 Gage location No. 5에서의 변형률과 압력과의 관계를 나타낸 것이다. 1차 압력 Cycle에서 압력과 변형률과의 관계는 각 Gage에 따라 비선형적 변형률의 발생량에서 차이는 있었지만 모두 비선형적이었으며 1차 압력 Cycle 종료후 모두 잔류 변형률이 발생하였다. 즉 용접부에서의 잔류응력과 압력의 상승에 동반하여 발생하는 응력이 중첩하여 재료의 항복강도를 초과하면 발생하는 비선형적 변형률이 모든 Gage location에서 감지되었다. 반면 2차 압력 Cycle에서의 부하 압력과 변형률과의 관계는 최고압력( $37 \text{ kg/cm}^2$ )까지 선형적이었으며 2차 압력 Cycle종료후의 잔류변형률의 값은 1차 압력 Cycle 종료후의 그것과 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 2차 압력 Cycle에 의해서는 추가적인 소성 변형률이 발생하지 않았다는 것을 의미하며 이 것으로부터 시험용기의 용접부는 MSR 시험압력에 의해 Shakedown이 달성되었다고 판정할 수 있었다.

한편 Fig. 8은 원통형 쉘에서의 1차 응력의 계측을 위한 Gage location No. 1에서의 1차 및 2차 압력 Cycle에 의한 부하 압력과 변형률과의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 용접부가 존재하지 않는 평활부에서의 내부응력은 비교적 낮기 때문에 1차 압력 Cycle에서도 하중과 변형률이 선형적인 관계라고 볼 수 있으나 본 시험용기에서는 그림에서와 같이 1차 압력 Cycle에 의해 상당히 큰 비선형 변형률이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 평활부에서의 비선형 변형률의 발생은 원

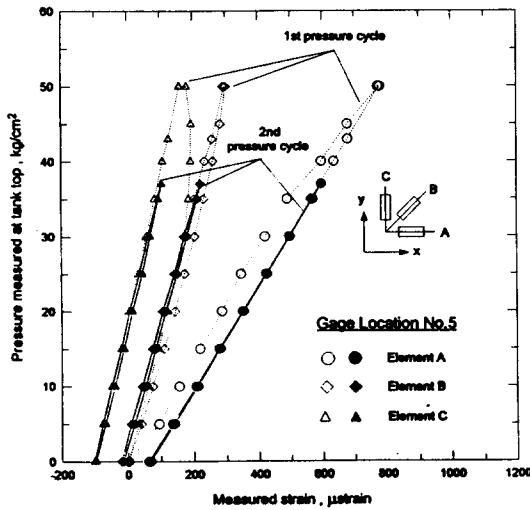


Fig. 7 Shakedown at gage location No.5 of test vessel

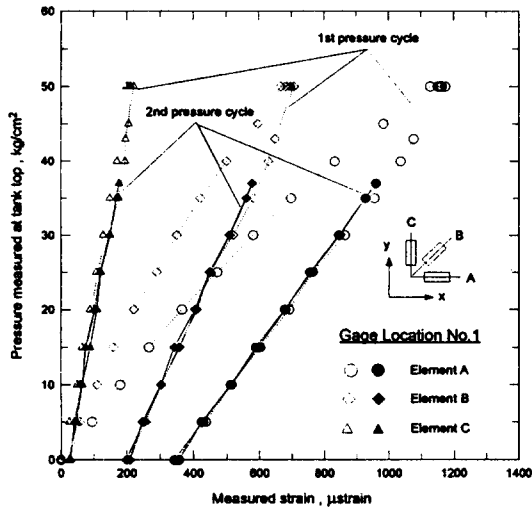


Fig. 8 Shakedown at gage location No.1 of test vessel

통형 쉘의 냉간 성형공정으로 인한 가공 잔류응력이 재료 내에 상당히 크게 남아있었다는 것을 의미한다. 즉 후판을 냉간 성형만에 의해 가공할 경우 가공후의 재료내부에는 큰 잔류응력이 발생하며 압력 Cycle에 수반된 응력과 중첩되어 소성변형이 발생할 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 결과는

MSR 시험과정에서 용기에서 발생할 수도 있는 파열현상의 방지에 관한 IGC의 요구사항에 대한 강력한 근거를 주는 것이며 MSR은 용기의 용접조립 과정에서 생긴 잔류응력뿐만 아니라 용기의 제작 공정 전반에 걸쳐 발생된 잔류응력의 완화에도 효과적이라는 것을 의미하고 있다. 반면 2차 압력 Cycle에서는 최고 시험압력까지 선형적인 거동을 나타내어 용접부에서와 마찬가지로 Shakedown이 달성되었다는 것을 알 수 있다.

Table 1에는 압력,  $P=33 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우 Gage location No. 1과 4면에서의 FEM 해석에 의한 주응력과 계측결과를 비교하여 나타낸 것이다. 계측결과는 압력  $30 \text{ kg/cm}^2$ 과  $35 \text{ kg/cm}^2$ 에서의 결과를 내삽하여 구한 것이다. 표에서의 비교로부터 해석결과와 실험결과가 양호한 일치율을 나타냄을 알 수 있다. 한편 Gage location No. 1에서의 계측값과 해석결과와의 차이는 실용기의 벽두께 (30mm)와 해석모델의 두께 (29mm)와의 차에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 1. Comparison of principal stress between measurement and FE analysis

	Gage location No. 1		Gage location No. 4	
	$\sigma_1 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$	$\sigma_2 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$	$\sigma_1 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$	$\sigma_2 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
Measurement	13.31	6.74	11.60	8.44
FE analysis	14.20	6.90	12.07	8.34

### 5. 결 론

이상과 같이 용접부에서 발생하는 용접 잔류응력을 완화하기 위하여 MSR에 대한 이론적인 고찰과 이의 요구사항에 준하여 작성된 기술절차서에 따라 단순 용접부와 실 압력용기에 대하여 MSR 시험을 적용한 결과는 다음과 같다.

FCAW 단순용접부에 대해 MSR 처리를 하는 경우 용접부에 발생한 용접잔류응력의 30% 이상이 감소하는 것이 확인되었다. 또한 실 압력용기의 용접부에 대한 MSR 처리에서도 압력용기의 모든 Gage 부착점에서 2차의 압력 Cycle을 부하하는 경우 용접잔류응력의 완화에 기인한 Shakedown이 확인되었다.

본고에서 간략하게 설명한 바와 같이 실 압력용기에 대해 MSR 처리를 적용하는 경우에 Gage 부착점의 결정에 구조해석을 이용하는 방법이 양호한 결과를 보여 주었고, 아울러 MSR 시험중 Strain gage에 의해 측정된 주응력은 FEM에 의한 시험용기의 Gage 부착점에서의 해석결과와 양호하게 대응하였다.

### 참 고 문 헌

1. 김 영식 : 최신용접공학, 형설출판사, p. 156, 1992
2. 이 순복 : "잔류응력의 공학적 응용", 대한기계학회지, Vol. 25, No. 2, p. 111, 1985
3. H. Kihara and K. Masubuchi : "Effect of residual stress on brittle fracture", WRS, Apr., p. 159, 1959
4. 송 달호, 이 해 : "원자력 압력용기의 소성변형에 의한 파괴방지를 위한 설계개념", 대한기계학회지, Vol. 33, No. 8, p. 728, 1993
5. 한 명수, 박 지선, 김 광석, 한 종만 : 대우중공업(주) 선박해양기술연구소, 1996
6. V.M. Kozousek and J.M. Jennings : Pressure vessel testing using strain measuring techniques, TID (Technical Investigation Department, U.K.) Report
7. IMO, International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gas in Bulk : IGC Code, 1993 ed. .
8. S. S. Gill, Inter. Series of Monographs in Mechanical Engineering, Vol. 3 : The Stress Analysis of Pressure Vessels and Pressure Vessel Components, Pergamon Press, p. 379, 1970