

CTOD 측정용 δ_5 Clip Gage 설계

박태현* · 남승훈** · 김엄기†

(2002년 12월 16일 접수, 2004년 2월 27일 심사완료)

Design of δ_5 Clip Gage for CTOD Measurement

Tai Heoun Park, Seung Hoon Nahm and Amkee Kim

Key Words: CTOD(균열선단열림변위), Clip Gage(변위게이지), Strain Gage(스트레인게이지), Finite Element Analysis(유한요소해석), Displacement(변위), EPFM(탄소성 파괴역학)

Abstract

The flaw assessment method based on δ_5 parameter was recently proposed and put to the practical use. However, since it is almost impossible to measure the δ_5 by the existing commercial clip gages, we need to develop the specially designed gages which are suitable for that purpose. In this research, a double cantilever type δ_5 clip gage with the traveling distance of 4mm was developed by the finite element analysis and the construction of Wheatstone bridge circuit including strain gages. The linearity of developed δ_5 clip gage was evaluated by the MTS extensometer calibrator with the proper adapters which allow the δ_5 clip gage to sit on the calibrator. Consequently, the δ_5 clip gage revealed the good linearity between the output voltage and the traveling distance of gage.

1. 서 론

현대 산업분야에 사용되는 산업설비는 점차 대형화 및 고성능화 되는 추세에 있으며 이에 비례하여 가동조건 또한 점차 가혹해지고 있다. 따라서 원자력발전소, 가스공급설비, 해양구조물 등 주요기기의 안전설계와 효과적인 운영의 문제는 매우 중요한 사항이 되었으며, 제작과정부터 존재했거나 사용 중에 발생한 결함으로 인한 파손

을 미연에 방지하기 위한 산업설비의 건전성 평가(integrity evaluation)가 필수적이다.⁽¹⁻²⁾

지금까지의 구조물 설계 및 건전성평가의 많은 부분이 선형탄성파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics ; LEFM)을 통하여 이루어져 왔으나, 고인성 구조재료의 도입 및 탄소성 파괴역학의 발전으로 인하여 정확한 건전성 해석에 LEFM을 대신한 탄소성 파괴역학(Elastic Plastic Fracture Mechanics ; EPFM)의 적용이 바람직하게 되었다.⁽³⁻⁵⁾ EPFM 해석에 사용되는 파라미터로는 균열선단열림변위(Crack Tip Opening Displacement ; CTOD)와 J 적분 등이 있으며 그 중에서 Schwalbe 등이 제안된 CTOD 파라미터인 δ_5 에 의한 결함(flaw) 평가법은 사용자가 비교적 간단한 방법으로 균열의 위험성(severity)을 평가할 수 있다는 장점으로 인하여 주목받는 방법이 되고 있다.⁽⁶⁻⁹⁾ 이 방법은 균열체(cracked body)의 예비균열(pre-crack)위치에서 균열선을

* 공주대학교 대학원 기계공학과
** 회원, 한국표준과학연구원
† 책임저자, 회원, 공주대학교 기계공학부
E-mail : amkec@kongju.ac.kr
TEL : (041)850-8616 FAX : (041)854-1449

대칭으로 초기간격이 5 mm인 두 지점의 변위(δ_5 로 정의함)로서 균열의 위험성을 평가하는데, 이 방법의 가장 큰 장점은 균열 선단으로부터 CTOD를 직접 측정한다는 점이다.

그러나 δ_5 의 측정은 CTOD가 균열 선단에서 직접 측정된다는 특성으로 인하여 기존의 상용 변위 게이지(clip gage)로는 측정이 불가능하며 이 용도에 맞게 특별히 고안한 변위 게이지를 사용해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 실험실에서 사용할 수 있는 수준의 정격사용범위가 4 mm인 δ_5 변위 게이지를 설계, 제작하고 선형성을 시험하였다.

2. δ_5 변위 게이지의 설계

2.1 변위 게이지 설계시 고려사항 및 감지부

재료

스트레인 게이지를 사용하여 변위 게이지를 설계할 때 고려해야 할 주요 사항을 정리하면 다음과 같다.^(10,11)

1. 강성이 크고 불필요한 질량체가 없는 구조가 되어야 한다.
2. 변위 게이지의 정격사용범위에서의 감지부의 변형을 분포가 균일해야 하며, 감지부 재료의 기계적 응답성, 스트레인 게이지의 피로수명, 측정기기와의 적합성(compatibility) 등을 고려하여 최대정격변위에서 감지부 변형률의 크기가 최대 1.7×10^{-3} 의 범위에 있어야 한다
3. 변위 게이지의 감지부를 제외한 부분의 변형이 최소화되도록 감지부 영역을 제외한 부분에 가능한 한 응력이 작게 작용되도록 해야 한다
4. 변위 게이지에서 가장 중요한 요소인 감지부의 재료는 정격사용변위범위 내에서 응력(stress)과 변형률(strain)의 관계가 완벽한 선형성을 가져야 한다.

본 연구에서는 변위 게이지 감지부 스프링재료로서 시효경화 처리된 베릴륨동(BeCu)을 선택하였다. 베릴륨동은 가격이 다소 고가이지만 열전도, 선형성 및 크리프 이력 등에서 매우 우수한 특성을 나타낸다. Table 1은 베릴륨동의 화학적 조성과 기계적 특성을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of BeCu

Element	Be	Co+Ni	Co+Ni+Fe	Cu+Be+Co+Ni+Fe
Wt.(%)	1.86	0.25	0.27	99.9

Description	Tensile Strength (MPa)	Poisson's ratio ν	Yield stress (MPa)	Modulus of elasticity, E (GPa)
Value	1,320	0.33	760	120

2.2 변위 게이지의 구조

본 연구에서 설계하고자 하는 δ_5 변위 게이지의 구조는 Fig. 1과 같다. 판상의 베릴륨동 감지부(sensing part) 양 끝에 각각 “L”자 모양의 알루미늄 기둥이 달려 있는 double cantilever 방식으로 알루미늄 기둥 끝단에 촉침이 조립된 구조이다. 촉침 간의 초기 간격은 5 mm이며 이 촉침이 시험편의 예비균열선단을 가로질러 게이지 길이(gage length)가 5 mm인 두 지점에 위치한 비커스 경도기 압입 자국에 삽입되어 촉침의 간격으로 δ_5 변위를 측정하게 된다.

Fig. 2는 δ_5 측정의 원리를 시험편에 위치한 δ_5 변위 게이지의 모습을 통하여 나타낸 것으로 실제 시험편에 장착하기 위해서는 고정구(jig) 도움을 필요로 한다.

δ_5 변위 게이지 감지부의 모양은 중앙에 슬릿홀(slot hole)이 있는 것과 없는 것, 2 종류로 해석하였으며 감지부의 크기는 Fig. 3과 같다. 감지부의 길이는 27 mm, 폭은 6 mm이며 양단에 알루미늄 기둥과 조립하기 위한 한 쌍의 원공이 있다. 감지부의 두께는 1.0 mm, 0.5 mm, 0.3 mm인 경우를 해석하였으며 후에 최적의 두께를 선정하였다. 감지부 상 하 표면에는 각각 2개씩 모두 4개의 스트레인 게이지가 부착된다.

2.3 슬릿 홀이 없는 감지부에 대한 유한요소해석

2.3.1 유한요소해석 모델

δ_5 변위 게이지의 변형특성을 조사하기 위하여 유한요소해석 (FEA)을 실시하였다. 유한요소해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며 Fig. 4는 해석에 사용된 유한요소 모델의 전체모습을 나타낸 것이다.

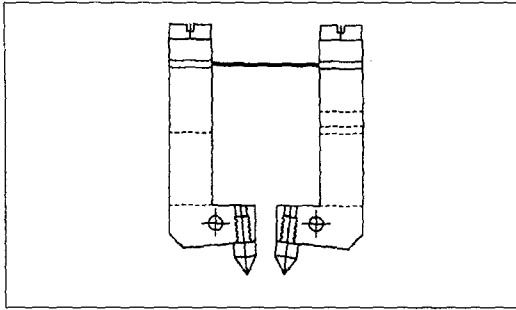


Fig. 1 Schematic drawing of δ_5 clip gage

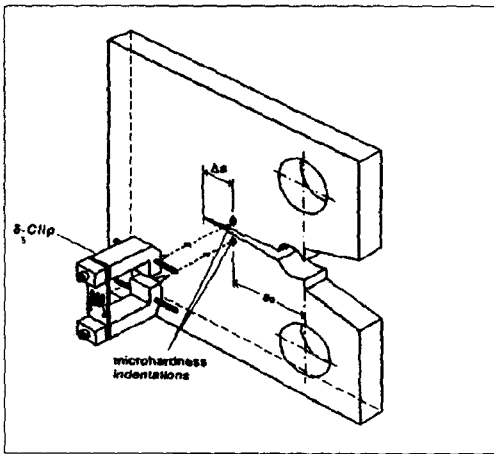


Fig. 2 Construction of experimental setup for the measurement of δ_5

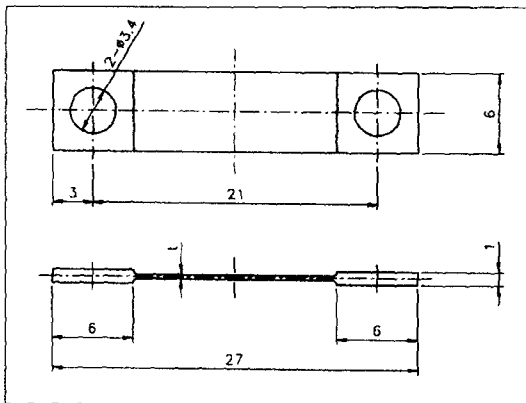


Fig. 3 Geometry of sensing part (unit: mm)

Fig. 5는 변위 게이지 감지부에 대한 유한요소 모델로서 감지부 변형과 축침간격의 기하학적 비

선형 관계를 고려하여 3차원모델을 사용하였으며 모델의 자세한 치수는 Fig. 3에 도시한 바와 같다. 해석에 사용한 유한요소는 8절점 iso-parametric solid 요소이다. “L”자형 알루미늄 기둥 부분은 단면이 감지부의 그것에 비하여 매우 커서 게이지 길이 방향으로의 변형이 거의 발생하지 않을 것으로 예상되기 때문에 이 부분에 속한 모든 유한요소는 강체(rigid body)로 간주되었다. 한편 감지부의 유한요소는 Table 2와 같은 물성값을 가진 베릴륨동으로 간주하여 탄성계수 E가 120 GPa이고, 푸아송의 비(Poisson's ratio) ν 가 0.33인 선형탄성체로 해석하였다. 감지부의 양쪽 끝은 강체 기둥(δ_5 변위 게이지의 알루미늄 기둥에 해당됨)에 고정되어 있어 강체 기둥의 끝단(축침 위치)의 간격이 벌어지면 감지부가 굽힘(deflection) 변형을 받게 된다. 본 연구에서는 강체 기둥의 끝단(축침 위치)의 간격을 변화시키며 유한요소해석을 수행하였다.

2.3.2 변위 게이지의 최대허용변위

Fig. 1에 도시되어 있는 변위 게이지 축침 간격을 0.5 mm씩 수평방향으로 증가시키며 δ_5 변위 게이지 감지부에 발생하는 최대 수직응력을 계산하였다. 계산된 최대 수직응력이 감지부 재료의 항복응력인 760 MPa에 도달하였을 때의 축침간의 간격을 변위 게이지의 최대허용변위로 정의하였다. Fig. 6에서 변위 게이지 축침간의 간격(displacement)에 비례하여 감지부의 응력이 증가하는 것을 알 수 있으며, 감지부 두께가 얇을수록 최대허용변위가 커지는 것을 알 수 있다. 두께 1.0 mm에서는 최대허용변위가 3.3 mm, 0.5 mm에서는 8.8 mm, 0.3 mm에서는 11.6 mm이다. 최대허용변위에서의 감지부의 응력분포는 두께에 관계없이 Fig. 7에 나타난 것처럼 감지부 중앙부 표면에서 응력집중 현상이 발생하여 최대응력이 나타나고 중앙에서 멀어지며 사라짐을 알 수 있다(두께 0.3 mm인 경우 약 12%의 응력집중이 발생하고 있음). 이 같은 감지부 표면에서의 응력구배의 발생은 변형률 분포(strain distribution)가 균일한 장소에 스트레인 게이지 부착해야 하는 변위 게이지 특성에 부합되지 않기 때문에 2.3절에서는 의한 슬릿 홈(slot hole)에 의하여 개선된다.

2.3.3 변위 게이지의 접촉력

δ_5 변위 게이지 축침 간격이 Fig. 6에서 계산된

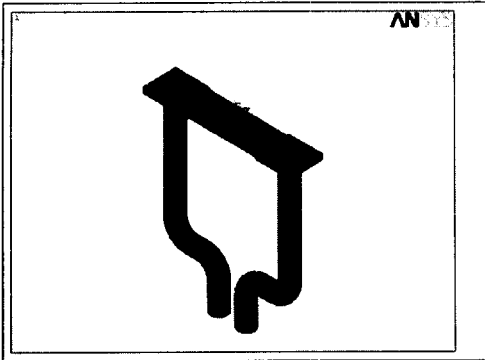


Fig. 4 F.E. model of δ_5 clip gage

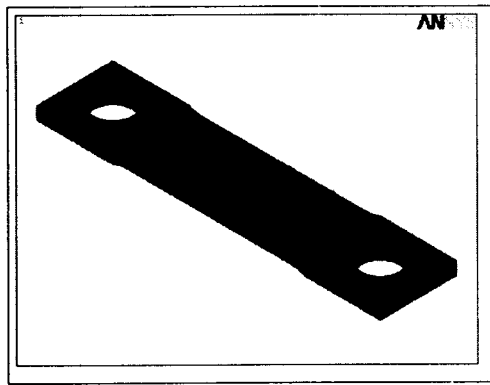


Fig. 5 F.E. model of sensing part

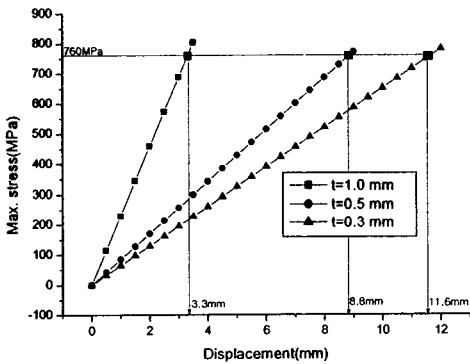


Fig. 6 Max. allowable displacement of clip gage with different thick sensing parts

최대 허용변위에 도달했을 때 변위 게이지 축침에 변위 방향으로 가해진 힘(reacting force)을 최대접촉력으로 정의하고 계산하였다. 감지부 두께가 1.0 mm인 경우에 최대허용변위에서의 최대

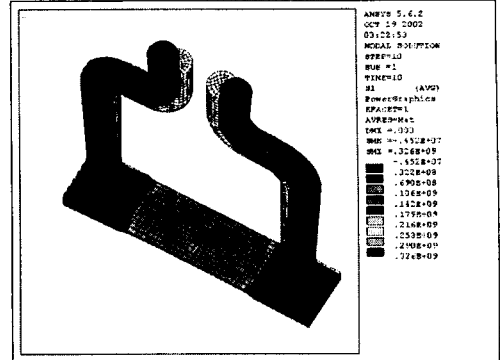


Fig. 7 Stress distribution in sensing part with the thickness of 0.3 mm

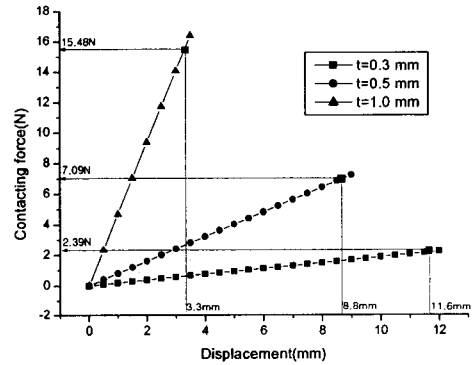


Fig. 8 Contact forces of pin of sensing part with different thickness

접촉력은 15.48 N이었고, 두께가 0.5 mm 경우에는 7.09 N이었으며, 두께가 0.3 mm 경우에는 2.39 N이었다.

2.3.4 변위 게이지의 감지부의 두께

이상의 감지부 두께의 영향을 조사한 결과로부터 다음 사실을 알 수 있다

1. 감지부의 항복응력에 기초한 최대허용변위가 두께 1 mm인 경우를 제외하면 본 연구에서 목표로 한 δ_5 변위 게이지의 정격사용범위인 4 mm을 초과하여 만족시키고 있다. 특히 두께 0.3 mm의 경우에는 11.6 mm로서 4 mm의 2.9 배나 되었다.
2. 두께가 얇으면 감지부의 강성(stiffness)이 감소하여 큰 변위에서도 축침에 가해지는 접촉력

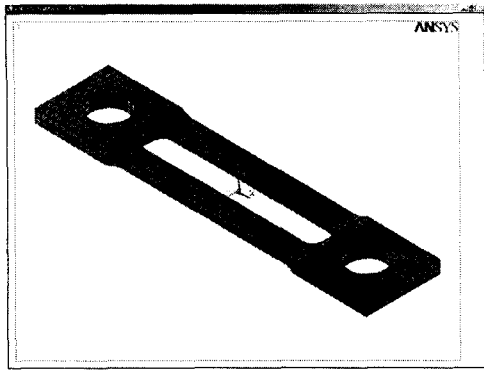


Fig. 9 F.E. model of sensing part with slot hole

이 매우 작았다. 3.0 mm의 변위가 주어졌을 때, 두께 0.3 mm인 경우의 접촉력은 두께가 1.0 mm인 경우의 4.0 %에 불과하였다.

따라서 본 연구에서는 감지부 두께가 0.3 mm인 경우가 최대허용변위 및 최소접촉력을 확보할 수 있으므로 두께를 0.3 mm로 결정하였다. 두께를 0.3 mm 이하로 선정하지 않은 이유는 가공의 편이성과 감지부 두께가 얇게 될 경우 감지부 표면의 변형률이 작아져 스트레인 게이지 출력력이 감소하기 때문에 이로 인한 변위 게이지의 분해능(resolution) 저하 현상을 방지하기 위한 것이다.

2.4 슬릿 홀이 가공된 감지부에 대한 유한요소 해석

2.4.1 변위 게이지의 최대허용변위 및 접촉력

감지부의 중앙에 발생하는 응력집중현상으로 인한 불균일한 변형률분포를 개선하고 변위 게이지의 유연성을 향상시키기 위하여 Fig. 9와 같이 두께 0.3 mm인 감지부에 폭 2 mm, 길이 15 mm인 슬릿 홀이 가공된 감지부를 고안하였다. 슬릿 홀이 가공된 감지부에 대한 유한요소해석 방법은 슬릿 홀이 없는 감지부에 대한 방법과 동일하며 유한요소모델은 Fig. 9와 같다. 슬릿 홀이 있는 경우의 해석결과와 슬릿 홀이 없는 변위 게이지의 해석 값과 비교 검토하면 다음과 같다.

1. 변위 게이지의 최대허용변위가 Fig. 10에서 나

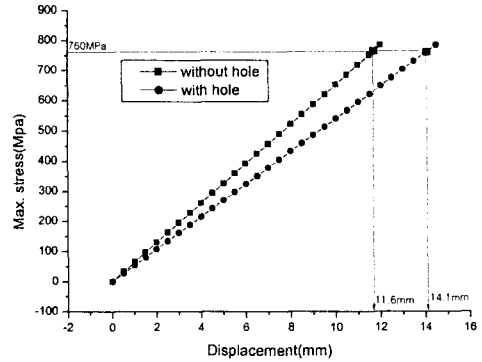


Fig. 10 Comparison of max. allowable displacements

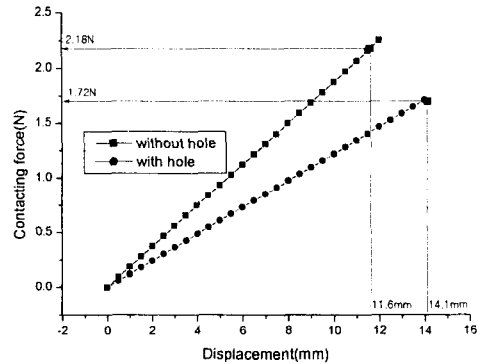


Fig. 11 Comparison of max. contact forces

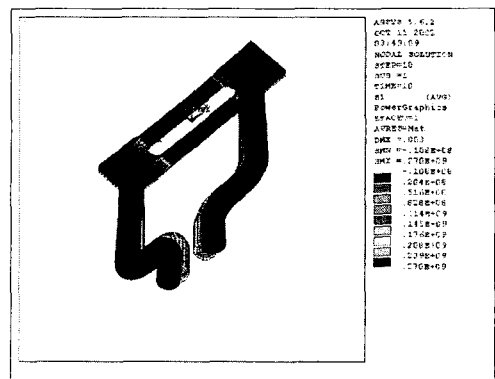


Fig. 12 Stress distribution in 3 mm thick sensing part with the slot hole

타넨 바와 같이 슬릿 홀이 없는 경우의 11.6 mm에서 슬릿 홀이 있는 경우의 14.1 mm로 21.5 % 증가하였다.

2. 변위 게이지 촉침의 최대 접촉력은 Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 2.18 N에서 1.72 N으로 21.1 % 감소하였다. 접촉력의 감소는 촉침의 초기 위치에서의 이탈 가능성을 감소시키므로 δ_5 측정의 신뢰성을 증가시킬 것으로 예상된다.
3. 최대허용변위에서의 변위 게이지 감지부에서의 응력분포는 Fig. 12에 나타난 것처럼 감지부 전면에 걸쳐 응력이 균일하게 분포하였다. 이는 슬릿 홀이 없을 때 응력집중현상에 의하여 감지부 중앙에 발생하는 불균일한 변형률 분포가 균일하게 개선되었음을 의미한다. 따라서 변위 게이지 감지부의 두께를 0.3 mm로 유지하면서 감지부에 슬릿 홀을 가공한 결과 변위 게이지의 성능이 뚜렷히 향상되는 효과를 확인할 수 있었다. 또한 슬릿 홀은 감지부 단면적을 감소시켜 변위 게이지의 분해능을 저하시키지 않고 감지부의 강성을 감소시키는 역할을 하게 된다.

2.4.2 변위 게이지의 정격사용범위

감지부의 두께가 0.3 mm이고 슬릿 홀이 가공된 δ_5 변위 게이지의 최대허용변위는 Fig. 10에서 나타낸 것과 같이 14.1 mm이다. 그러나 유효하게 사용할 수 있는 정격사용범위는 2.1절에서 기술한 바와 같이 감지부의 변형률이 스트레인 게이지의 정밀도가 유지되는 변형률범위(working strain range) 1.7×10^{-3} 에 의하여 제한을 받게 되는데 이를 변위 게이지의 정격사용범위로 정의하면 슬릿 홀이 있고 두께가 0.3 mm인 δ_5 변위 게이지의 정격사용범위는 Fig. 13에서와 같이 4.0 mm가 된다. 이는 변위 게이지 최대허용변위 14.1 mm의 28.4 %에 해당하는 것이다.

2.5 감지부의 변형률구배

감지부 길이방향으로의 변형률구배(strain gradient)는 변위 게이지의 선형성을 유지하는 중요 요소이기 때문에 유한요소해석을 통하여 변형률의 구배를 구해 보았다. Fig. 14와 Fig. 15는 슬릿 홀이 있는 0.3 mm 두께 변위 게이지의 최대 정격사용변위(4 mm)에서의 감지부 인장영역(하부표면)과 압축영역(상부표면)에 나타나는 중앙으로부터의 거리 변화에 따른 수직변형률의 변화를 나타낸 것이다. 모두 중앙 점에서 1.0 mm까지 균일하며 이후 완만하게 감소하는 경향을 나타낸

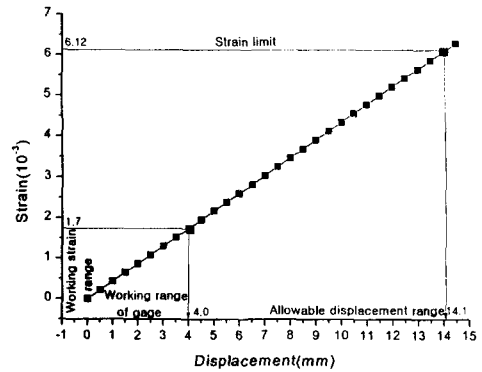


Fig. 13 Working range of δ_5 clip gage

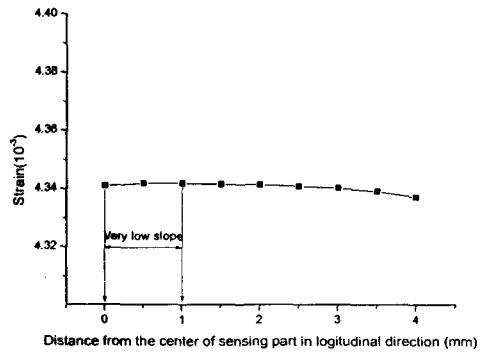


Fig. 14 Axial strain distribution of the bottom surface of sensing part in the longitudinal direction

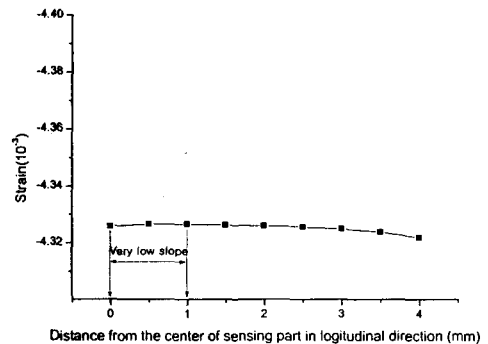


Fig. 15 Axial strain distribution of the top surface of sensing part in the longitudinal direction

다. 인장영역에서 최대변형률은 4.342×10^{-3} 이고 최소변형률은 4.337×10^{-3} 이며, 압축영역에서의

최대변형률은 -4.326×10^{-3} 이고 최소변형률은 -4.321×10^{-3} . 따라서 게이지 길이가 2 mm의 스트레인 게이지였다지를 사용할 경우 스트레인 게이지의 최적 부착지점이 감지부 중앙 2 mm 영역임을 알 수 있다.

3. δ_5 변위 게이지의 제작 및 교정

3.1 변위 게이지의 감지부 제작

변위 게이지 해석결과를 바탕으로 변위 게이지 감지부를 제작하고 스트레인 게이지를 부착하였다. 스트레인 게이지를 감지부의 중앙부 상면에 2개 하면에 2개를 각각 부착하여 Wheatstone full-bridge 회로를 구성하였다. Fig. 16은 Wheatstone bridge 회로를 나타내고 있다. MM사의 M-Bond 610 epoxy 접착제로 감지부에 부

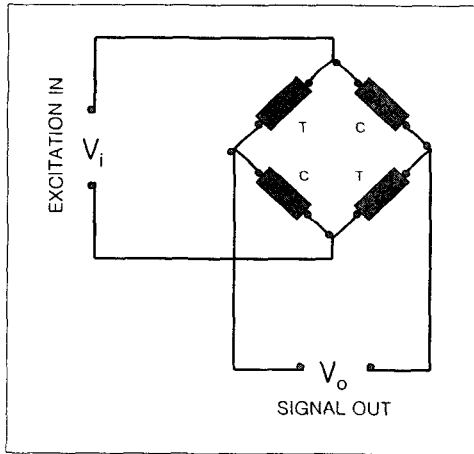


Fig. 16 Wheatstone full-bridge circuit

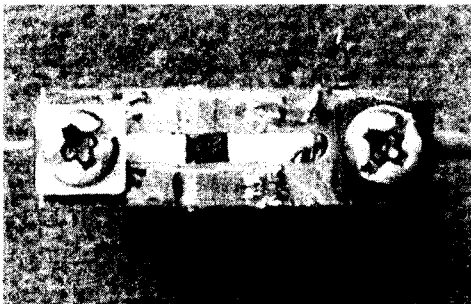


Fig. 17 Strain gages on sensing part of δ_5 clip gage

착된 스트레인 게이지는 부착 직후 135 °C에서 2시간 30분 동안 curing되었고, 뒤이어 165 °C에서 2시간 30분 동안 post curing되었다. Fig. 17은 감지부에 부착한 스트레인 게이지의 모습을 나타낸 것이며, 사용한 스트레인 게이지는 센서용 게이지로 미국 MM사 제품(N2A-06-T001N-350)을 사용하였다. 게이지 길이가 2.0 mm, 너비가 1.5 mm이며 저항값은 350 Ω 이다.

Fig. 18은 δ_5 변위 게이지의 알루미늄기둥과 축침, 감지부, 스트레인 게이지 등이 조립된 δ_5 변위 게이지의 모습을 나타낸 것이다.

3.2 δ_5 변위 게이지의 선형성 시험

제작된 δ_5 변위 게이지의 선형성 검증 및 gage factor를 구하기 위하여 선형성 시험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 교정기는 MTS사의 상용 변위 게이지 교정기(calibrator)로 adaptor부분을 개조하여 변위 게이지가 실제 시험편에 설치되었을 때와 동일한 상태가 되도록 하여 시험하였다. δ_5 변위 게이지를 교정기에 장착하여 게이지의 두 축침간의 초기간격(5 mm)을 교정기의 마이크로미터 다이얼로 0.25 mm씩 증가시켜 총 변위가 1.5 mm(축침의 간격이 6.5 mm)가 될 때까지 이송시켜 가며 δ_5 변위 게이지의 출력을 측정하였다. 게이지의 재현성을 시험

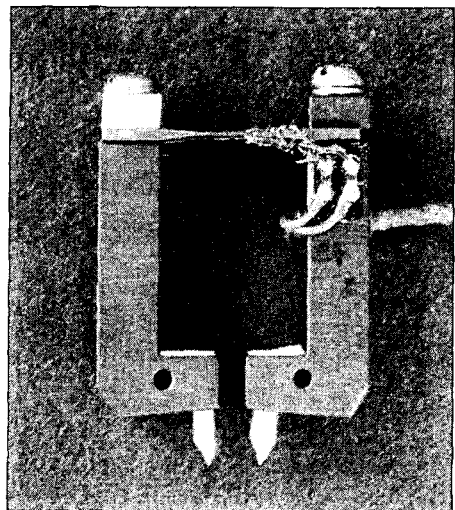


Fig. 18 Appearance of δ_5 clip gage

Table 2 Result of calibration for δ_5 clip gage

Displacement (mm)	Output(mV/V)					Average Output (mV/V)	Normalized Output (mV/V)	Nonlinearity Error (%)
	1	2	3	4	5			
0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
0.25	0.3823	0.3788	0.3798	0.3789	0.3826	0.3804	0.3836	-0.14
0.50	0.7646	0.7604	0.7622	0.7624	0.7643	0.7628	0.7672	-0.19
0.75	1.1471	1.1466	1.1459	1.1469	1.1470	1.1467	1.1507	-0.17
1.00	1.5298	1.5314	1.5304	1.5325	1.5309	1.5310	1.5343	-0.14
1.25	1.9157	1.9153	1.9164	1.9165	1.9163	1.9160	1.9179	-0.08
1.50	2.2998	2.3088	2.3000	2.3029	2.3003	2.3014	2.3014	0.00

할 목적으로 이상에서 설명한 것과 같은 방법으로 총 5회 걸쳐 측정하였다. 이때 사용한 변위 게이지의 출력은 입력전압으로 무차원화 하여 mV/V로 표시하였다. 측정에 사용한 출력 지시장치는 독일 HBM사 모델 DK3856 제품이다.

Table 2는 교정결과를 정리하여 나타낸 것이며 Fig. 19는 δ_5 변위 게이지의 선형성 및 오차를 검토하기 위하여 δ_5 변위 게이지의 출력(output)과 변위(displacement)와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 δ_5 변위 게이지의 출력은 5회 측정된 값의 평균값을 사용하였다. 출력과 변위는 식 (1)과 같은 선형관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

$$\frac{\Delta V_o}{V_i} = K_g \delta_5 \quad (1)$$

여기서 $\frac{\Delta V_o}{V_i}$ 는 mV/V로 나타낸 δ_5 변위 게이지의 출력이며, δ_5 는 δ_5 변위 게이지의 mm로 나타낸 변위이고, K_g 는 비례상수(gage factor)로서 1.5343 mV/V/mm이었다. Table 2에 나타낸 normalized output은 식 (1)으로 계산한 δ_5 변위 게이지의 출력을 나타내며 실제 측정값과의 차이가 δ_5 변위 게이지의 선형성에서 벗어난 측정오차를 나타낸다. Table 2에 나타낸 비선형오차(nonlinearity error)는 주어진 변위에서 5회 측정된 출력의 평균값을 변위 1.5 mm에서의 출력값인 2.3014 mV/V로 나눈 값을 나타낸 것이다. 평

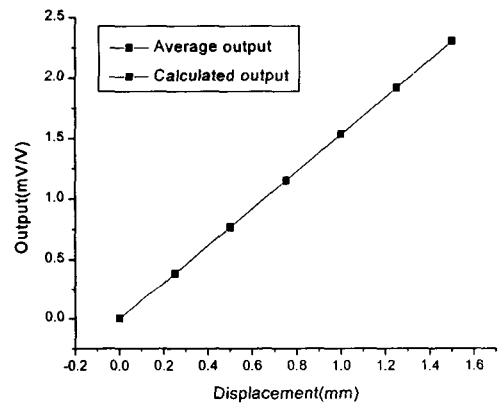


Fig. 19 A linear relationship between δ_5 clip gage output and displacement

균값을 기준으로 했을 때 최대 비선형오차가 0.20 %인 범위 내에 있음을 알 수 있다. 이를 변위로 환산하여 나타내면 0.003mm이다. 본 연구에서 사용한 교정기의 정밀도가 0.001 mm인 점을 고려하면 1.5 mm의 범위에서의 δ_5 변위게이지의 최대 비선형오차의 평균은 0.003 mm가 된다.

4. 결론

본 연구에서는 정격 사용범위 4 mm인 접촉식 δ_5 변위 게이지를 유한요소해석을 통하여 설계 제작한 후 교정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 베릴륨동 변위 게이지 감지부의 두께가 1.0 mm, 0.5 mm, 0.3 mm인 세 종류를 검토한 결과 슬릿홀이 가공된 두께 0.3 mm가 최적임을 확인하였다.

(2) 슬릿홀이 가공된 두께 0.3 mm의 감지부의 인장영역(하부표면)과 압축영역(상부표면)에서 모두 변형을 구배가 매우 작았으며 특히 중앙부 2 mm 이내에서 변형을 변화는 거의 없었다. 따라서 스트레인 게이지의 부착지점으로 중앙지점이 최적임을 알 수 있다

(3) 개발한 δ_5 변위 게이지 측침에 작용하는 최대허용변위에서의 접촉력은 1.72 N이었다. 따라서 변위 게이지를 시험편에 부착시키는 고정구는 1.72 N의 접촉력에 의해서 측침이 시험편과의 초기 접촉위치에서 이탈하지 않도록 제작되어야 한다.

(4) 변위 1.50 mm까지의 교정결과 개발된 δ_5 변위 게이지의 비선형오차의 평균은 정격출력 대비 최대 0.20 %이었으며 이를 변위 오차로 환산하면 0.003 mm이었다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 안전계측센터의 안전계측기술개발사업의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- (1) German M. D. et al., 1982, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Flawed Stainless Steel Pipes," *EPRI Report NP-2608*.
- (2) Harrison, R. P., Loosemore, L. and Milne, I., 1976, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," *CEGB Report R/H/R6*.
- (3) Gordon, J. R., Neale, B. K. and Wang, Y. Y., 1995, "A Comparison of J and CTOD as Elastic-Plastic Fracture Characterization Parameters," *ASTM STP 1244*, pp. 425~444.
- (4) Rice, J. R., 1968, "A Path Independent Integral

and Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," *Int. J. of Applied mechanics*, pp. 379~386.

- (5) Bergley, J. A. and Landes, J.D., "The J-Integral as a Fracture Criterion in Fracture Toughness", *ASTM STP 514*, pp. 1~23.
- (6) Kim, A., Nahm, S. H., Jin, W. and Ko, S. W., 2000, "Comparative Study on Crack Tip Opening Displacement δ_5 R-Curve and δ_{BS} R-Curve," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 3, pp. 794~802.
- (7) Hellmann, D. and Schwalbe, K. H., 1986, "On the Experimental Determination of CTOD Based R-Curves," *The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics Workshop on CTOD Methodology*, Schwalbe, K. H. Rd., Springer Verlag, pp. 115~132.
- (8) Schwalbe, K. H., 1986, "The Prediction of Failure Situations Using the CTOD Concept Based on the Engineering Treatment Model(ETM)," *The Crack Tip Opening Displacement in Elastic-Plastic Fracture Mechanics Workshop on CTOD Methodology*, Schwalbe, K. H. Rd., Springer Verlag, pp. 315~340.
- (9) Heerens, J., Schwalbe, K. H., Nix, C., 1993, "Influence of Specimen Size on J-, Jm- and δ_5 -R Curves for Side-Grooved Compact Tension Specimens," *Constraint Effects in Fracture*, ASTM STP 1171, Hackett, E. M., Schwalbe, K. H. and Dodds, R. H., Eds., *American Society for Testing and Materials, Philadelphia*, pp. 429~472.
- (10) The Technical Staff of Measurements Group, Inc., 1988, *Strain Gage Based Transducers Their Design and Construction*, Measurements Group, Inc., Raleigh.
- (11) Kim, C. Y., Song, J. H., 2002, "Design, Construction and Use of A Displacement Gage for M(T) Specimens" *Transactions of the KSME A*, Vol. 26, No. 3, pp. 415~427.