

# 부분절단법에 의한 콘크리트 구조물의 지속응력 측정에 관한 연구

## Sustained Stress Measurement on Concrete Structures By a Partial Sectioning Method

민 호 기\*  
Min, Ho Ki

박 대 성\*\*  
Park, Dae Sung

김 우\*\*\*  
Kim, Woo

---

### Abstract

This study describes a practical method for the measurement of sustained stress in concrete structures. In most cases, the sustained stress was determined by various theoretical calculation. However, the theoretical calculation can not always provide a sufficient information on the current stress state due to lots of uncertainty. Therefore, the present study proposes a practical in situ measuring method, Partial Sectioning Method.

---

### 1. 서론

자중을 포함한 사하중에 의한 지속응력의 평가는 구조물의 내하력 평가시 중요한 요소임에도 불구하고 측정된 단면제원을 가지고 이론적인 구조계산을 수행하여 평가하는데 그치고 있다. 이론적인 구조계산을 통하여 정확한 지속응력을 유추할 수 있다면 이상적인 평가방법이 될 수 있겠으나 하중이력이나 주변환경 등에 의하여 손상된 부분이나 국부적인 취약지역에서의 응력상태를 계산한다는 것은 어려운 과제이다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위해 구조물에 손상을 주지 않는 비파괴 범위내에서 지속응력을 측정하는 방법을 제안하고자 한 것이다. 유한요소(ADINA)해석을 통하여 구조물의 적용 가능성을 검증하고, 기존의 잔류응력 측정 방법중에 천공법(Hole Drilling Method)의 근본적 배경이론을 조사하여 본 연구에서 제안하는 부분절단법(Partial Sectioning Method)에 적용하였다.

---

\* 전남대학교 토목공학과 석사과정

\*\* 전남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

## 2. 부분절단법의 제안

그림 1과 같이 절단폭의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하고 절단면(BC)을 따라서 절단을 실시하면 표면 부착된 스트레인 게이지에서는 절단깊이(H)에 따른 변형률 이완이 발생하고 이 변형률 값을 응력-변형률 관계식에 적용하여 절단전의 응력을 측정할 수 있다<sup>2)</sup>.

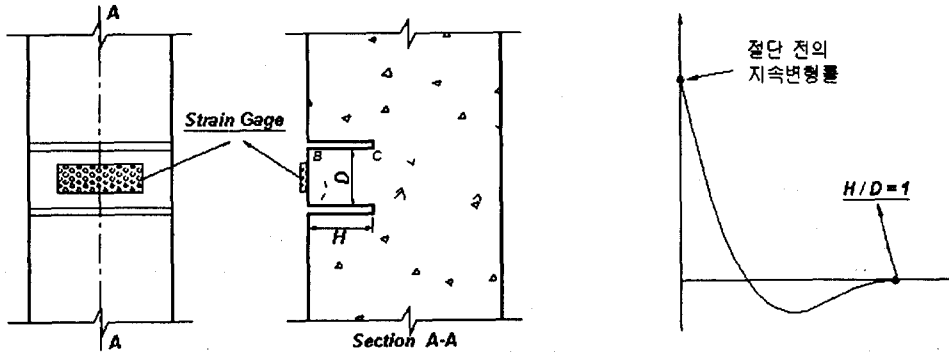


그림 1 부분절단 형상 및 변형률 이완 곡선

기존의 잔류응력 측정법은 균일한 응력장에 제한되고 부재의 일부분을 완전히 관통하여 절단하거나 표면의 전부를 절단해야 하므로 이러한 방법을 휨부재와 같이 단면깊이 방향으로 응력이 변화하는 콘크리트 구조물에 적용하는 것은 구조물의 손상 및 지속응력 측정의 오차를 수반한다. 이런 문제점을 해결하기 위해 구조물의 손상을 최소화하고 측정값의 정확성을 높일 수 있는 1·2·4면부분절단법을 제안하였다. 이 방법은 그림 2와 같이 스트레인 게이지를 표면에 부착하고 1면을 부분절단하여 변형률 이완을 측정하고 다음 2면을 부분절단하여 변형률 이완을 측정하고 마지막으로 3·4면을 모두 절단한 후 사각형 모양으로 절단된 상태에서 변형률 이완을 측정하여 절단 전의 지속응력을 구하는 것이다. 이 방법을 실제 구조물에 적용하기 위해 구조물의 손상을 최소화할 수 있는 절단깊이(H)와 지속응력 측정에 필요한 Strain Gauge 및 응력 보정계수를 유한요소 해석을 통하여 제시하였다.

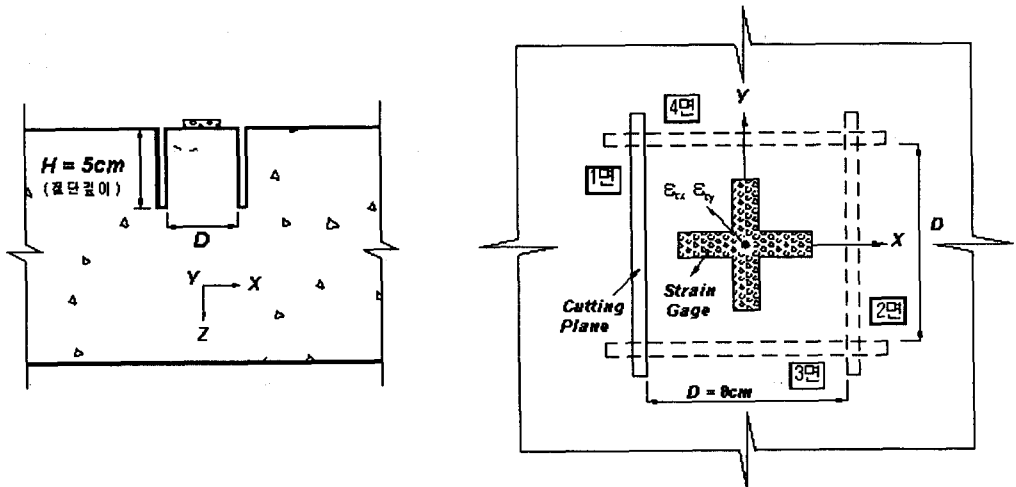


그림 2 1·2·4면부분절단법

## 2.1 최적 절단깊이 결정

최적 절단깊이는 구조물의 손상을 최소화하고 충분한 응력이완 및 측정작업의 용이성을 고려하여 결정하였으며 최적 절단깊이 결정을 위해 부착 가능한 스트레인 게이지의 크기를 고려하여 절단폭( $D$ )은 8cm로 하고 유한요소 해석을 수행하여 절단폭 구간에서 응력(변형률)이완을 조사하였다.

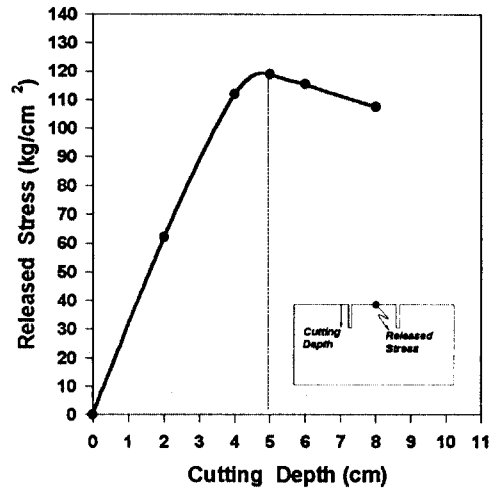


그림 3 부분절단법의 응력이완 곡선

부분절단법은 그림 3과 같이 응력이완이  $H/D=0.6$ 부근에서 최대 응력이완이 나타나고 0.6을 전후해서 이완응력의 변화량이 적기 때문에 절단깊이( $H$ )는  $0.6D$ 부근의 값이 되도록 선택하는 것이 유리할 것이다. 응력이완 조사 구간(절단폭,  $D$ )은 8cm고  $H/D$ 가 0.6부근의 값을 갖도록 하기위한 절단깊이는 5cm가 적당하다. 따라서 구조물의 손상을 최소화하고 충분한 응력이완 및 현장 적용성을 고려한 최적의 절단깊이는 1·2·4면부분절단 모두 5cm로 결정하였다.

## 3. 보정계수 산출

### 3.1 Strain Gage 보정계수

Strain Gage 보정은 응력이완 조사 구간( $D=8cm$ ) 중앙을 기준으로 하여 수행되며 스트레인 게이지 지시값은 게이지 길이(Grid Length)에 대한 평균 변형률이므로 중앙의 변형률로 보정되어야 한다. 게이지 길이에 따라 분포된 변형률이 일정하거나 선형 변화한다면 스트레인 게이지 지시값은 응력이완 조사 구간 중앙의 변형률과 같으므로 보정이 필요하지 않지만 곡선이거나 각 위치에서 변형률 분포가 현저한 변화를 보인다면 측정된 변형률은 보정되어야 한다.

게이지 길이에 따른 변형률 분포가 그림 4와 같을 때 Strain Gage 보정계수식은 다음과 같다.

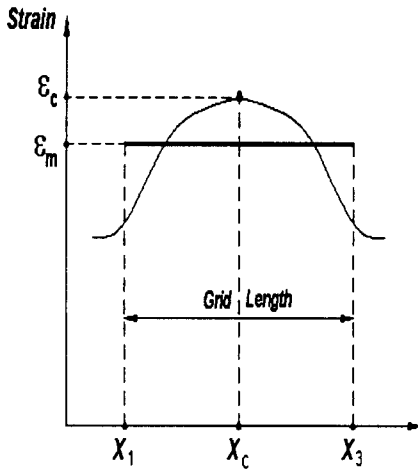


그림 4 평균 변형률

$$\alpha \times \epsilon_m = \epsilon_c \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_m} \quad (2)$$

여기서

$$\epsilon_m = \frac{1}{X_3 - X_1} \int_{X_1}^{X_3} \epsilon \, dx$$

$\epsilon_m$  : 평균 변형률, *Strain Gage Reading*

$\epsilon_c$  : 응력이완 조사 구간(절단폭) 중앙 변형률 (유한요소 해석값)

$\alpha$  : *Strain Gage* 보정계수

*Strain Gage* 보정계수는 게이지 길이(*Grid Length*) 30mm, 60mm에 대하여 산정하였으며 유한요소 해석 결과  $b \geq 30\text{cm}$ 이면 부재 폭의 증가에 비해 변형률 이완의 변화가 매우 적은 것으로 나타났기 때문에  $b=20\text{cm}$ ,  $b \geq 30\text{cm}$ 의 두 경우로 구분하여 산정하였다. 1·2·4면부분절단의 *Strain Gage* 보정계수는 표 1~표 3과 같다.

### 3.2 이완응력 보정

부분절단 진행시 최종 절단깊이에서 절단 전의 지속응력은 완전히 이완되지 않기 때문에 먼저 표 면 부착된 스트레인 게이지에 지시된 변형률을 판독하여 *Strain Gage* 보정계수를 적용하여 보정을 한 후 탄성이론식을 적용하여 부분절단으로 인하여 발생된 응력 이완량을 구한다. 이 값은 응력 보정계수를 적용하여 절단 전의 지속응력으로 수정된다

$$\epsilon_{cx} = \alpha_x \times \epsilon_x \quad (3)$$

$$\epsilon_{cy} = \alpha_y \times \epsilon_y \quad (4)$$

$$\sigma_{cx} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\alpha_x \epsilon_x + \nu \alpha_y \epsilon_y) \quad (5)$$

$$\beta = \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{cx}} \quad (6)$$

여기서

$\epsilon_{cx}$ ,  $\epsilon_{cy}$  : 절단폭 중앙의 변형률(그림2)      $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  : *Strain Gage Reading*(평균 변형률)

$\sigma_{cx}$  : 응력 이완량

$\sigma_{co}$  : 절단전의 응력

$\beta$  : 응력 보정계수

$\alpha_x, \alpha_y$  : Strain Gage 보정계수

1면부분절단의 응력 보정계수는 압축응력비 ( $1:\sigma_H/\sigma_{surf}$ ) 에 따라 절단 전 응력의 약 70~95%정도 응력 이완이 이루어지기 때문에 1보다 큰 값을 가지며 2·4면부분절단의 경우는 압축응력비에 따라서 절단전 응력의 약100~135%이므로 1보다 작은 값을 가진다. 응력 보정계수도  $b=20cm, b\geq 30cm$ 로 구분하여 산정하였다. 1·2·4면부분절단의 응력 보정계수는 그림 5~그림 7과 같다.

표 1 1면부분절단의 Strain Gage 보정계수

부재폭	b=20cm				b≥30cm			
	30mm		60mm		30mm		60mm	
	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$
압축응력비								
1 : 0	1.01	1	1.015	1	1.01	1	1.011	1
1 : 0.1	1.01	1	1.018	1	1.01	1	1.015	1
1 : 0.2	1.01	1	1.024	1	1.01	1	1.021	1
1 : 0.3	1.01	1	1.033	1	1.01	1	1.027	1.026
1 : 0.4	1.01	1	1.038	1	1.01	1	1.035	1.025
1 : 0.5	1.013	1	1.046	1	1.013	1	1.04	1.024
1 : 0.6	1.015	1	1.05	1	1.015	1	1.045	1.023
1 : 0.7	1.015	1	1.055	1	1.015	1	1.052	1.022
1 : 0.8	1.017	1	1.059	1	1.017	1	1.057	1.03
1 : 0.9	1.017	1	1.065	1	1.017	1	1.061	1.03
1 : 1	1.018	1	1.069	1	1.019	1	1.065	1.048

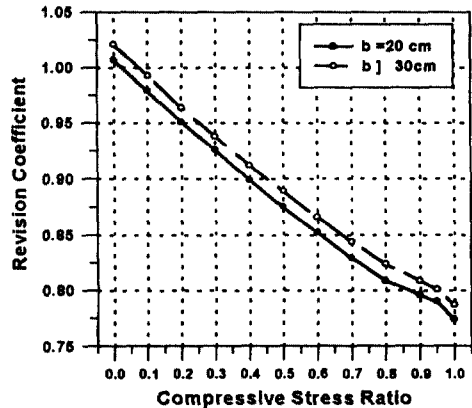


그림 7 4면부분절단의 응력 보정계수

표 2 2면부분절단의 Strain Gage 보정계수

부재폭	b=20cm				b≥30cm			
	30mm		60mm		30mm		60mm	
	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$
압축응력비								
1 : 0	1	0.957	1.005	0.899	1	0.977	1	0.944
1 : 0.1	1	0.970	1.012	0.934	1	0.979	1.008	0.948
1 : 0.2	1.005	0.972	1.023	0.929	1.003	0.980	1.017	0.961
1 : 0.3	1.007	0.974	1.033	0.942	1.005	0.981	1.025	0.963
1 : 0.4	1.011	0.975	1.043	0.937	1.01	1	1.033	0.983
1 : 0.5	1.013	0.977	1.049	0.940	1.013	1	1.043	0.984
1 : 0.6	1.014	0.978	1.058	0.943	1.013	1	1.053	0.984
1 : 0.7	1.016	0.979	1.067	0.946	1.016	1	1.060	1
1 : 0.8	1.019	0.987	1.073	0.961	1.018	1	1.067	1
1 : 0.9	1.021	0.987	1.080	0.969	1.017	1	1.071	1
1 : 1	1.022	0.988	1.083	0.97	1.021	1	1.080	1

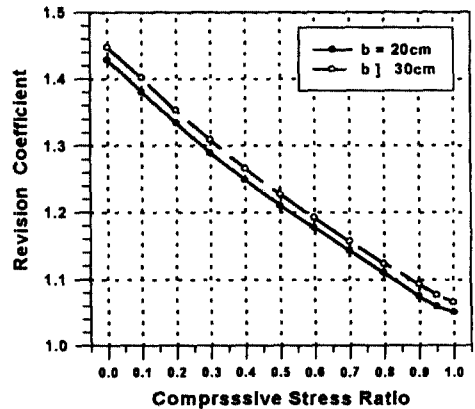


그림 5 1면부분절단의 응력 보정계수

표 3 4면부분절단의 Strain Gage 보정계수

부재폭	b=20cm				b≥30cm			
	30mm		60mm		30mm		60mm	
	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_x$	$\alpha_y$
1 : 0	1	1	0.994	1.019	0.996	1.012	0.989	1.025
1 : 0.1	1	1	1	1.018	1	1.012	1	1.025
1 : 0.2	1	1	1.012	1.018	1	1	1.008	1.018
1 : 0.3	1	1	1.018	1.017	1	1	1.014	1.018
1 : 0.4	1.007	1	1.026	1.017	1.007	1	1.025	1.017
1 : 0.5	1.009	1	1.034	1.017	1.007	1	1.031	1.017
1 : 0.6	1.011	1	1.042	1.016	1.011	1	1.039	1.017
1 : 0.7	1.012	1	1.051	1.016	1.011	1	1.046	1.016
1 : 0.8	1.014	1	1.056	1.011	1.014	1	1.053	1.011
1 : 0.9	1.017	1	1.062	1.01	1.016	1	1.058	1.011
1 : 1	1.017	1	1.066	1.01	1.016	1	1.065	1.01

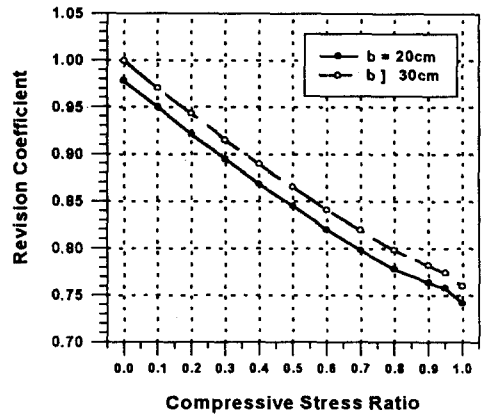


그림 6 2면부분절단의 응력 보정계수

#### 4. 결론

1·2·4면부분절단의 최적 절단깊이는 구조물의 손상을 최소화하고 절단깊이의 부정확성으로 인한 오차를 줄일 수 있고 스트레인 게이지의 크기 및 현장 작업의 용이성을 고려하여 5cm로 결정하였으며 각 부분절단에서 부재 폭이 30cm이상 확보되면 응력(변형률) 이완량의 변화가 부재 폭의 증가에 비해 매우 적은 것으로 나타났다. 압축응력비에 따라서 1면부분절단의 응력 보정계수는 1.45~1.05, 2면부분절단은 1~0.75, 4면부분절단은 1~0.79의 값을 갖는다.

#### 참고문헌

1. 박대성, "콘크리트 구조물의 상시응력 측정에 관한 연구", 전남대 석사학위 논문, 1998.
2. Joseph Schwaighofer, "Determination of Residual Stresses on the Surface of Structural Parts", Experimental Mechanics, Vol. 4, No. 2, 1946, pp. 54-56.
3. N. J. Rendler and I. Vigness, "Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses", Experimental Mechanics, Vol. 6, No. 12, Dec. 1966, pp. 577-586.
4. Jia-Yong Wang, "Measurement of Residual Stress by the Hole-Drilling Method : On the Direction of Maximum Residual Stress", Experimental Mechanics Vol. 28, No. 1, Mar. 1988, pp. 24-26.
5. Jia-Yong Wang, "Measurement of Residual Stress by the Hole-Drilling Method : General Stress-Strain Relationship and Its Solution", Experimental Mechanics Vol. 28, No. 4, Dec. 1988, pp. 355-358.
6. ASTM, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method(E387-95)".