

유용설계 영역내 철근콘크리트 전단벽의 ASOFM 해석에 관한 연구

The AFOSM Study of RC Shear Wall within Feasible Design Area

김요숙* 신영수** 이화미***
Kim, Yosuk Shin, Yeong-Soo Lee, Hwa-Mi

ABSTRACT

In Korea, the multi-dwelling residential buildings are most popular housing system that is reinforced concrete shear wall system. However, the serviceability and safety of the system have been decreased because of the errors in design or construction and inadequate maintenance. In addition the safety of the system cannot be evaluated reasonably because the system is analyzed by the deterministic approach. Therefore, this study is aimed to analyze reinforced concrete shear walls by the reliability approach considering uncertainty based on the probability theory.

In this study, a reliability analysis program using MATLAB is developed by combining AFOSM and Sampling Method for the reinforced concrete shear walls within feasible design area. The reasonable reliability index β of ultimate limit states for RC shear walls are calculated automatically using this developed program with the measured data those have means and standard deviations in the field. The ultimate states are compression failure, tension failure, governing compression, and governing bending of the reinforced concrete shear walls respectively. To estimate the safety of the system using developed program can be used to predict residual life-time of the system.

1. 서 론

국내 집합주택은 대부분 철근콘크리트 전단벽 구조로 이루어져 있다. 철근콘크리트는 2개의 이질재료 즉 철근과 콘크리트를 일체화시킨 복합 구조체로서, 철근과 콘크리트가 각각의 불확실성을 포함하고 있다. 콘크리트 강도의 경우, 실제 시공된 콘크리트 강도가 표준 양생한 콘크리트 공시체의 재령28일 시험값보다 작게 나타나는 것이 일반적이며 동일 건물이라 할지라도 시공의 정도에 따라 균일하지 못하다. 또한 콘크리트에 어떠한 손상에 의해 철근 부식이 촉진될 수 있고, 이는 철근의 단면적의 손실로 취급해서 철근의 인장 저항 능력이 떨어진 것으로 간주할 수 있다. 뿐만 아니라 설계, 시공상의 오류, 사후관리 불충분 등의 이유로 인하여 원래의 내구성능을 발휘하지 못해 건물의 사용성이나 안전성이 저하되는 것도 사실이다. 설계의 중요한 변수인 하중과 강도, 구조물의 기하학적 치수나 재료 특성도 불확실성(Uncertainty)을 포함하고 있기 때문에 기존의 확정론적 구조해석(Deterministic approach)으로는 구조물의 합리적인 안전성을 평가할 수 없다.

* 정회원, 이화여자대학교 연구교수, 공학박사

** 정회원, 이화여자대학교 부교수, 공학박사

*** 이화여자대학교 건축학과 석사과정

최근 불확실성을 합리적으로 고려하기 위하여 확률론(Probability)에 기초한 신뢰성 해석(Reliability analysis) 기법이 위험도 분석 및 안전도 평가에 적용되고 있다. 구조신뢰성 해석은 구조해석에 사용되는 요소들을 확률변수로 정의하고, 확률-통계 이론을 적용하여 구조물의 안전성에 대한 정량적인 지표 즉 신뢰도 지수(Reliability index, β)를 계산해 낸다. 이 방법은 불확실한 요소들을 체계적으로 고려하여 합리적인 안전성 평가를 실현하기 때문에 구조물의 안전성 평가에 필수적인 기술로 활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 정립된 구조신뢰성 해석이론을 바탕으로, 철근콘크리트 전단벽에 대한 확률론적인 안전성 평가를 수행할 수 있는 방법을 개발하고자 한다. 본 연구의 기법은 우선 실측한 일련의 확률 데이터를 난수추출법(Random number sampling method)에 의해 새로운 데이터를 추출하고, 하중 상태점이 유용설계영역(Feasible design area)인지를 판별한 후 개선된 1계2차모멘트법(Advanced first-order second moment : AFOSM)에 의한 신뢰도 지수 β 를 구하는 것이다. 일반적으로 철근콘크리트 전단벽은 압축재인 기둥으로 간주하여 설계되므로, 본 연구에서도 철근콘크리트 전단벽을 기둥 설계법으로 분석하였다. 철근콘크리트 전단벽의 거동에 대해서는 선형탄성범위(Linear-elastic)까지만 고려하였다.

2. 신뢰성해석을 위한 확률변수 및 한계상태식 검토

2.1 철근콘크리트 전단벽의 기본 확률 변수

철근콘크리트 벽체(기둥)의 확률변수들을 크게 2가지로 구분하여 일반적인 확률변수와 좌굴(Buckling)과 시간의존성(Time-dependent)을 고려하는 특수한 확률변수에 대하여 표 1에 정리하였다. 표 2에는 신뢰도 지수 β 값에 따른 구조물의 상태와 파괴확률을 나타내었다.

표 1 확률변수의 분류

일반적인 경우	두께(b), 길이(h), 철근단면적(A_s), 콘크리트단면적(A_c), 철근비(ρ), 피복두께, 단면2차모멘트(I), 철근항복강도(f_y), 콘크리트압축강도(f_{ck}), P_{dead} , P_{live} , M_{dead} , M_{live}	
특수한 경우	좌굴	유효길이계수(k), 부재의 높이(L), 단면2차반경(r)
	시간	철근항복강도(f_y), 콘크리트압축강도(f_{ck}), 중성화 깊이

표 2 Reliability Index at Each State¹⁾

Reliability index β	Limit state	P_f
2	Serviceability limit state not involving life safety (cracking or spalling of cover)	10^{-2}
3	Strength limit state associated with ductile failure (a curvature equal to the maximum usable strain)	10^{-3}
3.5	Strength limit state associated with brittle failure (crushing of masonry block or buckling of steel)	10^{-4}

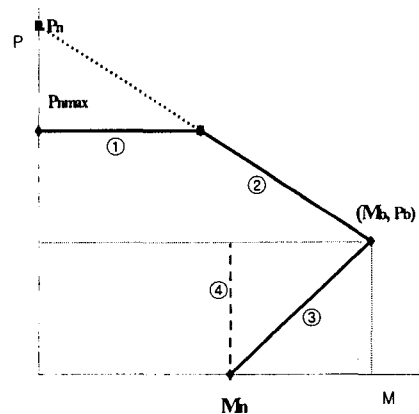


그림 1 P-M 상관도와 한계상태식

2.2 철근콘크리트 전단벽의 한계상태식

신뢰성 해석을 수행하려면 먼저 구조물의 안전과 파괴를 판단할 수 있는 설계기준(Design criterion) Z 가 구조물에 가해지는 하중요소(Load factor) L 과 그에 저항하는 구조물의 저항요소(Resistance factor) R 로 표시되어야 한다. 이를 식(1)에 나타내었다.

$$Z = R - L \quad (1)$$

여기서 저항 R 이 하중 L 보다 크다면 구조물이 안전한 경우이고, 저항 R 이 하중 L 보다 작다면 구조물에 파괴가 발생하는 경우이며, 기준 Z 가 '0'과 같을 때는 구조물의 안전과 파괴의 경계에 있음을 의미한다.

식(1)과 같은 설계기준식은 대개가 해석의 대상이 되는 구조물의 파괴양상(Failure mode)에 따라 유도된 식으로서 한계상태식(Limit state equation) 혹은 파괴방정식(Failure equation)이라고 한다. 철근콘크리트 전단벽에 관한 한계상태식 $g(x)$ 를 다음 3가지 경우로 정리하였다.

2.2.1 순수압축을 받는 기둥(그림 1의 ①)

순수압축을 받는 기둥에 대한 한계상태식은 식(2)와 같다.

$$g(x) = \psi P_{n\max} - P_u \quad (2)$$

여기서 $P_{n\max}$ 은 공칭 최대 축하중으로서 식(3)과 같고, P_u 는 계수하중, ψ 는 강도감소계수이다.

$$\psi P_{n\max} = 0.8\psi [0.85f_{ck}A_c + f_yA_s] \quad (3)$$

여기서 A_c 는 콘크리트 단면적, A_s 는 철근의 단면적, f_{ck} 는 콘크리트 설계기준강도, f_y 는 철근의 설계항복강도, ρ_g 는 철근비이다.

2.2.2 편심이 작용하는 기둥(그림 1의 ④)

편심이 작용하는 기둥에 대한 한계상태식은 식(4)와 식(5)를 사용할 수 있다.

$$g(x) = B[P^2 + (\frac{Pe'}{h})^2]^{3/4} - [(D+L)^2 + (\frac{(D+L)e'}{h})^2]^{3/4} \quad (4)$$

여기서 B 는 휨에 대한 모델링 계수로서 KS와 ACI 318-83에서는 0.9를 ANSI에서는 0.85를 사용하고 있다. D 와 L 은 계수를 곱하지 않은 고정하중(Dead load)과 활하중(Live load)을 말한다. e' 은 인장철근의 중심에서 측정된 작용축하중의 편심거리이고, h 는 단면 길이이다.

$$g(x) = \psi M_n - M_u \quad (5)$$

여기서 M_n 은 공칭모멘트로서 식(6)과 같다.

$$M_n = [C_c(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}) + C_s(\frac{h}{2} - d) + T_s(\frac{h}{2} - d)] \quad (6)$$

식(6)에서 C_c 는 콘크리트에 의한 압축력, C_s 는 철근에 의한 압축력, T_s 는 철근에 의한 인장력으로서 각각 식(7), 식(8), 식(9)와 같다.

$$C_c = 0.85f_{ck}ha \quad a = \beta_1c \quad c = \frac{0.003 \times d}{0.003 + f_y/E_s} \quad (7)$$

$$C_s = A_s(f_y - 0.85f_{ck}) \quad (8)$$

$$T_s = A_s f_y \quad (9)$$

여기서 d 는 압축연단에서 인장철근 중심까지의 거리, a 는 등가직사각형 응력 블록(Stress block)의 깊이를 나타낸다. 또한 β_1 은 콘크리트 압축강도에 의해 결정되는 계수로서 식(10)과 같다.

$$\beta_1 = 0.85 \quad (f_{ck} \leq 280 \text{kgf/cm}^2)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007 \frac{(f_{ck} - 280)}{10} \geq 0.65 \quad (f_{ck} \geq 280 \text{kgf/cm}^2)$$
(10)

2.2.3 휨과 축력을 동시에 받는 기둥(그림 1의 ②와 ③)

휨과 축력을 동시에 받는 기둥에 대한 압축파괴 한계상태식은 식(11), 인장파괴 한계상태식은 식(12)에 각각 나타내었다.

$$g(x) = 1 - \left(\frac{P}{P_{\max}} + \frac{M}{M_{\max}} \right) = P_n - P_u - \frac{P_n - P_b}{M_b} M_u \quad (11)$$

$$g(x) = P_b - P_u + \frac{M_u - M_b}{M_b - M_n} P_b \quad (12)$$

여기서 M_b 는 균형변형률 상태의 휨 모멘트로서 $C_c(h-a)/2 + C_s(h/2-d) + T_s$ 이며, P_b 는 균형변형률 상태의 압축력으로서 $C_c + C_s - T_s$ 이다.

3. 유용설계 영역내 철근콘크리트 전단벽에 대한 AFOSM 해석

본 연구에서 개발된 구조신뢰성 해석기법은 우선 난수추출에 의한 새로운 데이터에 대해 유용설계영역인지 판별하고 난수추출에 의한 데이터에 대해 간접적으로 파괴확률을 추정하는 AFOSM을 순차적으로 사용하였다. 난수추출 하는 이유는 안전성에 영향을 미칠 수 있는 통계학적 고유변량, 추정오차 또는 불충분하거나 불완전한 정보로 인한 오차, 실측한 데이터가 가지는 불확실성을 고려하기 위해서이다. 물론 추출된 데이터들에 의해 바로 신뢰도지수 β 를 계산하는 시뮬레이션법(Simulation method)을 적용할 수도 있다. 그러나 시뮬레이션법은 유효한 정밀도를 얻기 위해서는 과대한 계산 시간을 감수해야 한다는 단점이 있기 때문에 본 연구에서는 난수를 추출하는 기법만 사용하였다. AFOSM의 단점 즉, 파괴영역에서도 신뢰도 지수 β 를 계산해 내는 점을 보완하기 위하여 철근콘크리트 전단벽에 대한 유용설계법을 개발하였다. 이에 의해 하중 상태점이 불유용설계영역(Infeasible design area)일 경우 신뢰성해석을 하지 않고 프로그램이 종료하도록 개발하였다. 따라서 AFOSM 해석에 의한 신뢰도 지수 β 는 모두 유용설계 영역내에 존재하는 상태점에 의한 것이다.

3.1 프로그램 구성

본 연구에서 개발된 프로그램은 MATLAB을 이용하여 크게 확률변수를 처리하는 부분, 유용설계영역 판별부분과 신뢰도 지수 β 를 계산하는 구조 신뢰성 ASOFM 해석부분으로 구성되어 있다. 본 연구에서 개발된 프로그램의 전체 흐름도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 음영이 있는 3개의 부분은 사용자의 입력을 요구하는 부분으로서 사용자의 선택에 따라 달라지는 부분이다.

확률변수 처리부분에 대한 상세 흐름도는 그림 3에 나타내었다. 설계변수가 확률변수인 경우는 평균과 표준편차를 입력하고, 확정론적 변수인 경우는 확정값과 '0'인 표준편차를 입력한다. 입력된 변수들의 평균과 표준편차를 가지고 난수추출법을 사용하여 난수표²⁾에서 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출한다. 생성된 각 확률변수는 난수값에 의해 결정된 PDF 함수값²⁾을 이용하여, 새로운 평균과 표준편차가 생성하게 된다. AFOSM 해석의 단점을 보완하는 유용설계법의 흐름도는 그림 4에 나타내었다. 유용설계법에 의하여 P-M 하중 상태점이 불유용설계 영역에 있을 경우는 프로그램이 자동으로 종료되

참고문헌 2에 신뢰성 해석 결과가 있는 것으로서, 고정 편심을 받는 기둥이며, 신뢰성 해석에 사용된 한계상태식은 식(2)와 같다.

기둥 단면은 350mm 정방형이고, 6개의 확률변수를 사용하였으며 확률변수의 통계적 성질을 표 3에 정리하였다. 6개의 확률변수는 작용하는 수직 하중(F), 모멘트(M), 콘크리트 강도(f_{ck}), 콘크리트의 단면적(A_c), 철근항복강도(f_y), 철근의 단면적(A_s)이며, 모든 변수는 정규분포이며 통계적으로 서로 독립이다. 연직철근의 항복강도 f_y 는 4,200(kgf/cm²)을 이용하여 대칭으로 배근하였고, 철근비 ρ 는 3%이며, 콘크리트의 강도 f_{ck} 는 280(kgf/cm²)를 사용하였다.

신뢰성 해석 결과값은 표 4에 정리하였다. 목표신뢰도 지수(Target value $\beta : \beta_T$)값은 참고문헌 2에서 사용한 3.63이다. 본 연구에서 개발된 프로그램에 의한 신뢰도 지수 β 는 3.629로서 두 값의 오차는 0.001%이다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법으로 고정 편심 e가 작용하는 기둥의 경우 정확한 신뢰도 지수 β 값을 얻을 수 있음이 입증되었다.

표 3 고정편심을 받는 기둥 확률변수의 통계적 특성

Var	f_{ck} (kgf/cm ²)	A_c (cm ²)	A_s (cm ²)	f_y (kgf/cm ²)	F (tonf)	M (tonf · m)
mean	280	1,188	37	4,200	200	12.65
st. dev.	28	59.4	3.7	420	20	1.27

표 4 고정편심을 받는 기둥의 신뢰성 해석 결과값

	신뢰도 지수 β
Target value ²⁾	3.630
검증예제 III	3.629

3.3 검증예제 II - 전단벽

철근콘크리트 전단벽의 신뢰성에 관한 실험적인 연구¹⁾가 있는 모델을 사용하여 본 연구에서 개발된 프로그램으로 해석하였다. 실험체는 전단벽이 콘크리트 보와 슬래브에 의하여 구속되어 있으며 그림 7과 같다.

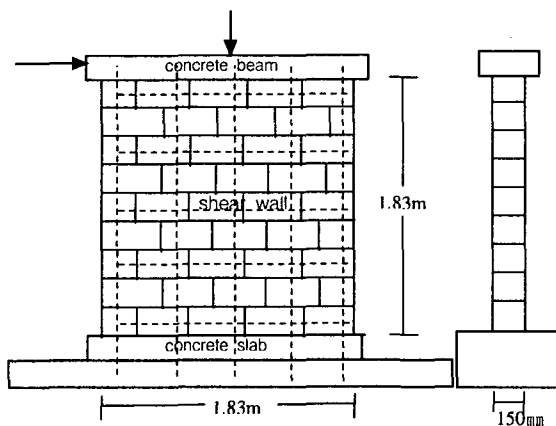


그림 7 전단벽의 모델링

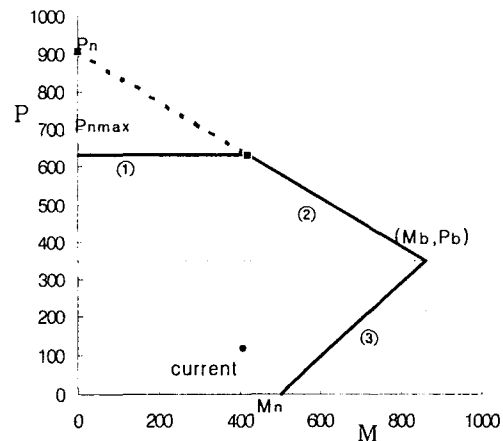


그림 8 전단벽모델의 P-M 상관도

본 모델에서는 4개의 일반적인 확률변수 즉, 실험에서 제시된 철근강도(f_y), 콘크리트강도(f_{ck}), 축하중(P), 횡하중에 의한 모멘트(M)를 사용하였다. 단 좌굴의 영향이나 시간의존성 변수는 제외하였다. 각 확률변수는 모두 정규분포이며 서로 통계적으로 독립이라고 가정하였다. 표 5에는 확률변수들에 대한 통계치(위)와 난수추출 횟수 n을 200번으로 새로운 확률변수 결과값(아래)을 나타내었다. 추출횟수는 실험적인 연구¹⁾에서 제시한 200번으로 하였다. 전단벽의 한계상태식에 대한 신

뢰성해석을 수행하여 그 결과값들은 표 6에 정리하였다. 본 모델은 그림 8의 P-M 상관도에서 알 수 있듯이 하중의 영향보다는 파괴하중의 84.6%를 받고 있는 모멘트의 영향이 지배적이라서 한계상태식 ③에 의한 신뢰도 지수 β 가 최소값으로서 1.023이고 파괴확률 P_f 는 약 0.153이다.

표 5 전단벽 확률변수의 통계적 특성

Var	f_{ck} (kgf/cm ²)	A_c (cm ²)	f_y (kgf/cm ²)	A_s (cm ²)	P_u (tonf)	M_u (tonf · m)
mean	155	2,784	4,500	1.99	52.488	56.566
st. dev.	31	27.84	450	0.0199	0	0
mean	152.53	2784.4	4533.76	2.00	52.488	56.566
st. dev.	28.24	25.86	406.91	0.019	0	0

표 6 각 한계상태식에 따른 전단벽의 신뢰성 해석 결과값

	Limit State Function $g(x)$	β	P_f
1	$\psi P_{n(max)} - P_u$	4.6567	1.609E-06
2	$P_u - P_n - \frac{P_n - P_b}{M_b} M_u$	2.8885	1.9353E-03
3	$P_b - P_u + \frac{M_u - M_b}{M_b - M_n} P_b$	1.0225	1.533E-01

3.4 예제 - 전단벽

그림 9와 같은 수직 등간격으로 배근된 철근콘크리트 전단벽의 확률변수들에 대한 통계치는 표 7에 정리하였고, 유용설계 영역내 P-M 상태점이 신뢰도지수 β 에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 신뢰도 지수 β 와 P-M 상관도를 그림 10에 3차원적으로 나타내었다.

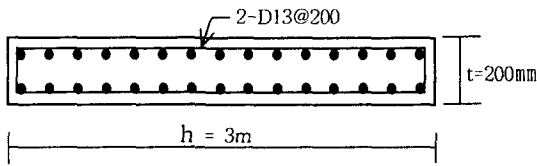


표 7 전단벽 확률변수의 통계적 특성

Var	f_{ck} (kgf/cm ²)	A_c (cm ²)	f_y (kgf/cm ²)	A_s (cm ²)
mean	240	5,997	4,000	2.54
st. dev.	15%	1%	10%	1%

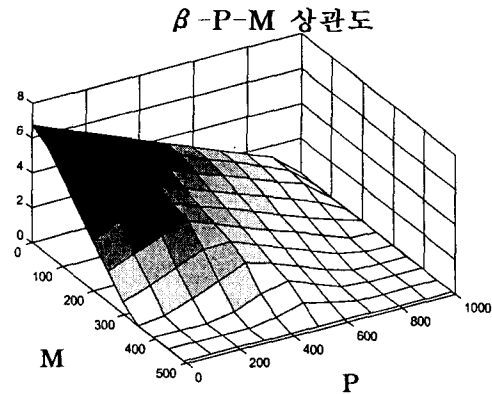


그림 10 β -P-M 상관도

4. 결 론

본 연구에서는 MATLAB을 이용하여, 확률론적인 변수들에 대한 난수를 추출하여 유용설계 영역내 철근콘크리트 전단벽의 AFOSM 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 사용하면 다음과 같은 장점과 해석결과를 얻을 수 있다.

- 1) 철근콘크리트 전단벽의 신뢰성 해석을 위한 확률 변수들을 구체화하였다. 구체화된 확률변수들로 신뢰성 해석을 수행하면 신뢰도 지수 β 에 확률변수의 영향이 나타나 파괴확률의 증가로 합리적인 위험도 분석 및 안전도 평가를 할 수 있다.
- 2) 철근콘크리트 전단벽의 내구성 진단 평가 시 실측한 확률론적 데이터들, 즉 평균과 표준편차를 가지는 데이터들이 난수추출법에 직접 사용되어 실측 데이터들의 확률변수로서의 영향을 신뢰도 해석에 고려할 수

있다.

- 3) 유용설계 영역내에 있는지 확인하는 유용설계법을 이용함으로써 AFOSM의 단점인 불유용설계 영역에서도 신뢰도지수 β 를 계산하는 단점을 보완하였다.
- 4) 철근콘크리트 전단벽에 대한 한계상태식을 고려하여 추출법과 유용설계법, AFOSM을 순차적으로 수행하는 프로그램을 개발하였다. 각 한계상태식과의 관계에서 도출된 신뢰도지수값들 중에서 최소값을 해석모델에 대한 신뢰도지수 β 로 간주할 수 있다.
- 5) 하중의 P-M 상태점이 신뢰도지수 β 에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 신뢰도지수 β 와 P-M 상관도를 3차원적으로 나타내는 기법을 개발하였다.

참고 문헌

1. 홍원기, "신뢰성 이론을 이용한 전단벽 응답감소계수의 산정", 대한건축학회논문집, v. 13, n. 5, 1997.5, pp.233~247
2. 오병환 외 9명, "확률 신뢰성 이론에 의한 구조물의 합리적 해석기법과 신뢰성 설계기준 개발(III)", 과학기술처 한국과학재단 보고서, 1991, p.410
3. Andrzej S. Nowak, *Reliability of Structures*, University of Michigan, 1997, p.316
4. Mori, Yasuhiro, *Reliability-based condition assessment and life prediction of concrete structures*, Ph.D. Thesis, University of Johns Hopkins, Baltimore, Maryland, 1993, p.209
5. 신성우 외, 통합설계법에 의한 콘크리트 구조설계기준 건축구조물 설계예제집, 대한건축학회, 2000, p.846
6. 양영순 외, 구조 신뢰성 공학, 서울대학교 출판부, 1999, p.248
7. Chu-Kia Wang, Charles G. Salmon, *Reinforced Concrete Design-6th edition*, Addison Wesley, 1998, p. 1028
8. James G. MacGregor, *Reinforced Concrete-Mechanics and Design*, Prentice Hall, 1988, p.939
9. A. H-S Ang & Wilson H. Tang, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Volume I, John Wiley & Sons, 1975
10. Elsayed A. Elsayed, *Reliability Engineering*, Addison Wesley Loangman, Inc., 1996, p.149

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 2000-0-310-001-3)지원으로 수행되었음.