유한요소법을 이용한 매스콘크리트구조물의 수화열 및 온도응력 해석에 관한 연구

A Study on the Heat Transfer Analysis and Thermal Stress Analysis of Mass Concrete Structure by Finite Element Method

강석화* 이용호** 정한중*** 박칠림****
Kang, Suck Hwa Lee, Yong Ho Jeong, Han Jung Park, Chil Lim

요 약

본 연구에서는 매스콘크리트의 온도응력을 해석적으로 검토하기 위하여 수화열 및 온도응력 해석용 프로그램을 개발하여 실구조물에 설치한 게이지에 의해 측정한 실측치와 비교검토를 하였다. 또한, 개발한 프로그램의 해석결과와 범용프로그램인 ADINA-T 및 ADINA와 해석결과를 비교하였다. 그 결과, 본 연구에서 개발한 해석시스템의 해석결과는 범용프로그램의 해석결과와도 좋은 일치를 보였고, 내부구속이 강한 구조물이나 외부구속이 강한 구조물 모두 내부의 온도 및 온도응력분포를 잘 평가하고 있음을 알았다. 따라서 본 연구에서 개발한 수화열 및 온도응력해석 프로그램은 매스콘크리트의 온도응력을 평가하는 데에 충분히 사용할 수 있음이 입증되었다.

Abstract

In this study, a program for evaluation of heat transfer and thermal stress of mass concrete is developed and verified by 2-experiments (internally and externally restricted). Furthermore, the result of the program is compared with those of ADINA-T and ADINA. As a result of the comparison, the proposed method produces comparable results with those from the popular programs (ADINA-T and ADINA) and shows the usefulness of the developed program for the evaluation of thermal stresses of mass concrete in both internally and externally restricted structures.

Keywords : mass concrete, thermal stress, temperature, concrete stress gauge, hydration heat, heat transfer

* 정회원, (주)대우건설기술연구소, 책임연구원
** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 연구원
*** 정회원, (주)대우건설기술연구소, 선임연구원
**** 정회원, (주)대우건설기술연구소 소장, 전무이사

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 1995년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근에는 콘크리트구조물의 대형화 및 고강도화에 따라 콘크리트는 초기강도가 많이 요구되고 또한 다량의 시멘트가 혼입되어 초기에 구조물에 온도균열을 발생시키고, 이것이 구조물 설계에 무시할 수 없는 영향을 일으키는 경우가 빈번히 일어나고 있다. 예전에는 이러한 온도균열이 콘크리트댐이나 부재치수가 큰 콘크리트 구조물에서만 발생하는 것으로 생각되어져 왔지만, 최근에는 사용재료나 시공조건의 개선 등으로 인해 비교적 치수가 작은 구조물에서도 유해한 균열이 생기는 사례가 적지 않게 발생하고 있다.

이러한 온도균열은 구조물내에서 발생하는 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 커질 경우에 발생하는 것으로 생각되어져 왔지만, 최근에는 비교적 치수가 작은 구조물에서도 유해한 균열이 생기는 사례가 적지 않게 발생하고 있다.

매스콘크리트의 온도응력을 예측하는 방법 중에는 실구조물에 직접 게이지를 설치해 응력상태를 검토하는 것이 가장 확실한 방법이라 할 수 있지만, 이 방법은 매우 번거롭고 또한 타설조건의 영향을 많이 받기 때문에, 타설조건이 변경되었을 경우에는 실험결과에 대한 일관된 설명이 부족하다. 따라서, 실질적으로 균열의 발생여부를 평가하는 데는 역시 경험에 따른 정성적인 판단에 의존해 왔다.[1] 그런 점에서 유한요소법등 수치해석법을 이용하여 해석적으로 검토하는 방법은 해석조건을 임의로 바꾸어 다양한 타설조건에 대해 해석할 수 있기 때문에 온도응력을 예측하는 수단으로서는 가장 효과적인 방법으로서 알려져 있다.[2]

매스콘크리트에 관련된 연구는 그 동안 일본을 중심으로 활발히 이루어져 현재는 수화열 및 온도응력에 대해서 어느 정도 그 실체가 규명되어 있지만,[3,4] 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 거의 이루어지지 않다가 최근 사회적인 필요성에 의해 여러 곳에서 활발히 연구가 이루어지고 있는 상태이다.[5,6,7]

저자들은 매스콘크리트의 수화열 및 온도응력을 해석적 및 실험적으로 검토하기 위하여 그 동안 연구를 수행하여, 실험적인 연구에 대해서는 이미 본 지를 통하여 발표한 바 있으며,[8] 해석적으로는 2차원 및 3차원 각각에 대해서 수화열 및 온도응력 해석용 프로그램을 개발하였다.

본 논문에서는 개발한 프로그램의 알고리즘을 설명하고, 실구조물에 매설한 열전대 및 유효응력계를 이용해 직접 측정한 온도 및 온도응력치와의 비교를 통하여 개발한 프로그램의 해석정확도를 검토하였다. 또한, 일반적으로 온도응력해석이 곤란한 것으로서 알려져 있는 ADINA-T 및 ADINA[9]를 사용한 온도응력계산법을 제안하여 본 연구에서 개발한 프로그램의 해석 알고리즘의 타당성에 대해서 검토하였다.

2. 유한요소법을 이용한 수화열 및 온도응력 해석

2.1 수화열 해석

내부발열이 있는 물체의 3차원 비정상 열전도방정식은 식(1)과 같은 편미분방정식의 형태로 주어진다.[10]

$$\frac{\partial}{\partial x} K_x\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y} K_y\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x} K_z\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) +Q(t) = C\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) \quad (1)$$

여기서 K_x, K_y, K_z ; 열전도율(kcal /mh℃)

$Q(t)$: 단위시간당에 단위체적당 공급되는 열량

T : 온도(℃)

C : 비열 (kcal /kg℃)

ρ : 밀도 (kg /m^3)

또한 경계조건으로서 경계상의 온도가 항상 주어져 있는 경우에는

$$T(x, y, z) = T_0(x, y, z) \quad (2)$$

그리고 경계에서 열유입 및 유출이 있는 경우에는

$$K_x\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)l + K_y\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)m + K_z\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)n +\alpha_0(T-T_a)+q=0 \quad (3)$$

여기서 l, m, n : 경계상에서의 방향여현

q : 표면의 열유속(kcal /m^2h)

α_0 : 표면의 열전달률(kcal /m^2h℃)

T_a : 대기의 온도 (℃)

이 때에 지배함수와 경계조건을 만족하는 범함수Π는 다음과 같이 정의된다.

$$\Pi=\int[\frac{1}{2}\{K_x(\frac{\partial T}{\partial_x})^2+K_y(\frac{\partial T}{\partial_y})^2+K_z(\frac{\partial T}{\partial_z})^2\} -((Q-C\rho\frac{\partial T}{\partial t})T]dV +\int q\,Tds+\int\frac{1}{2}\alpha_0(T-T_a)^2ds \qquad (4)$$

유한요소의 기본개념으로 부터 어떤 요소내의 임의의 위치의 온도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x, y, z, t) = N(x, y, z)\ T(t) \qquad (5)$$

식(4)를 T(t)에 대해서 변분을 하여 정리하면, 비정상열전도문제에 대한 유한요소식은 식(6)과 같이 형상함수[N]의 함수로 되어 있는 식이 얻어진다.

$$[C]\{\frac{\partial T}{\partial t}\}+[K]\{T\}=\{Q\} \qquad (6)$$

여기서 [C]는 열용량행렬이고, [K]는 열전도행렬, {Q}는 온도하중벡터이다.

일반적으로 식(6)과 같이 시간에 관한 미분형태를 가지는 문제의 해를 구하기 위해서는 Wilson θ법, Newmark β법, Houbolt법등이 많이 사용되지만, 식(6)은 시간에 관한 1계 미분형태만을 가지고 있기 때문에 본 연구에서는 Euler법과 Modified Newton-Raphson법을 사용하였으며,[11] 연립방정식의 풀이를 위해서는 Half bandwidth를 사용한 Gauss 소거법을 사용하였다.

본 연구에서 개발한 프로그램은 2차원해석용은 4절점 직사각형요소를 사용하고 있으며, 3차원해석용은 8절점 solid요소를 사용하고 있다. 해석결과는 절점에서 출력되도록 되어 있고, 콘크리트의 타설시점이 다른 연속타설시에도 해석이 가능하도록 되어 있다. 또한 콘크리트의 수화발열과정은

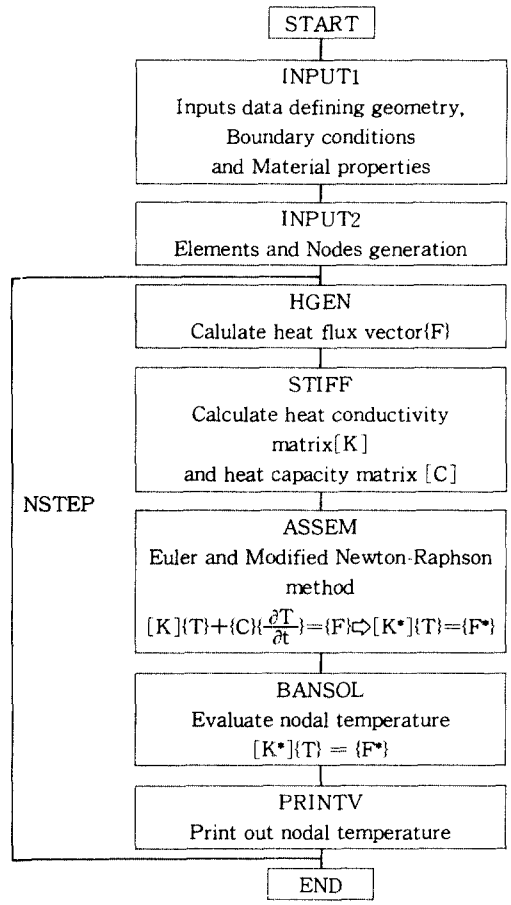

Fig. 1 Flow chart of heat transfer analysis by FEM

단열온도상승식에 의해 단위시간당의 발열량을 계산하여 도입하도록 되어 있다.

본 연구에서 개발한 수화열해석 프로그램의 해석흐름도는 Fig. 1과 같다.

2.2 온도응력 해석

매스콘크리트의 온도응력을 해석하는 프로그램의 기본 해석과정은 일반 구조해석 프로그램과 기본적으로는 동일하다. 그러나 탄성계수가 재령과 더불어 변화하기 때문에 이것을 적절히 고려할 수 있는 알고리즘을 포함시켜야 한다. 이와 같은 경우에는 통상 증분법(step-by-step method)이라고 불리우는 방법이 사용된다. 이 방법은 각 스텝에서의 재료 물성을 일정하다고 가정한 상태에서,

각 스텝의 온도변화량에 대하여 탄성해석으로 구한 온도응력의 증분$\Delta\sigma i$를 식(7)과 같이 그 이전시간 까지의 값에 가산을 해 계산하고자 하는 재령에서의 온도응력을 구하도록 되어 있다.

$$\sigma_n = \sum_{i=1}^{n} \Delta\sigma_i \qquad (7)$$

여기서 σ_n : n스텝에서의 온도응력,

$\Delta\sigma_i$: i스텝에서의 온도응력 증분량

이것을 개념적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

따라서 수화열해석을 통해 얻어진 온도변화량 ΔT를 온도응력해석에서는 하중으로 입력시켜 온도변형량을 구한 후 그 값으로 부터 온도응력의 증가량을 계산하지만, 이 때에 온도변화에 따른 자유변형의 증가량$\Delta\varepsilon^{TH}$를 계산한 변형량$\Delta\varepsilon$으로부터 빼 주어야만 응력을 야기시키는 탄성변형에 의한 온도응력의 증가량을 계산할 수가 있다.

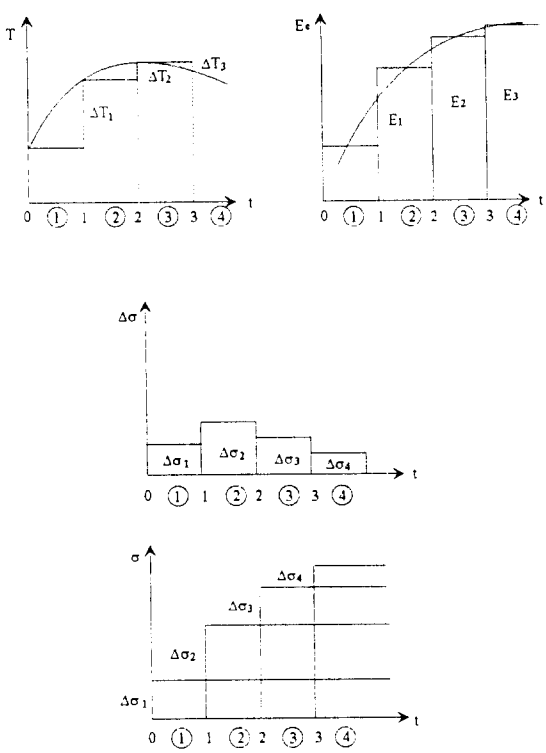

Fig. 2 Schematic drawing of step-by-step method

시간 t 와 t+Δt사이의 총변형의 증가량은 식(8)과 같다.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{e} + \Delta\varepsilon^{TH} \qquad (8)$$

여기서, $\Delta\varepsilon^{e}$는 탄성변형의 증가량이고, $\Delta\varepsilon^{TH}$는 자유변형의 증가량이다.

따라서 온도응력의 증가량은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta\sigma = [D]\,(\Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon^{TH}) \qquad (9)$$

그러므로 총 변위, 변형, 온도응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta^{t+\Delta t} = \delta^{t} + \Delta\delta \qquad (10)$$

$$\varepsilon^{t+\Delta t} = \varepsilon^{t} + \Delta\varepsilon \qquad (11)$$

$$\delta^{t+\Delta t} = \delta^{t} + \Delta\delta \qquad (12)$$

또한 본 연구에서는 시간경과에 따른 크리프의 영향을 고려하기 위하여 크리프모델[12]을 이용한 소위 초기변형률법을 사용하였다. 이 방법은 처음에 계산을 시작할 때는 탄성해를 구하고 점차로 스텝내의 크리프변형률 증분을 초기변형률로 취급하여 다시 계산하는 방법으로서, 크리프해석을 위해서는 CEB-FIP 1990모델식[13]을 사용하였으며, 크리프포아송비는 탄성포아송비와 같은 값을 사용하였다.

본 해석프로그램은 수화열해석 프로그램과 마찬가지로 연속타설시에 대해서도 해석이 가능하도록 개발되었으며, 해석결과는 수화열해석의 경우와는 달리 Gauss Point에서 출력이 되도록 되어 있다.

온도응력해석 프로그램의 해석흐름도는 Fig. 3과 같다.

3. 범용프로그램과의 해석결과 비교

본 연구에서는 개발한 수화열 및 온도응력해석 프로그램의 해석 정확도를 검증하기 위하여, ADINA -T와 ADINA를 사용하였다. 그리고 검증을 위해서는 참고문헌8)에 나타난 구조물을 사용하였다. 비교에 있어서는 해석 대상구조물이 3차원 구조물이므로 3차원 수화열해석 결과에 대해서

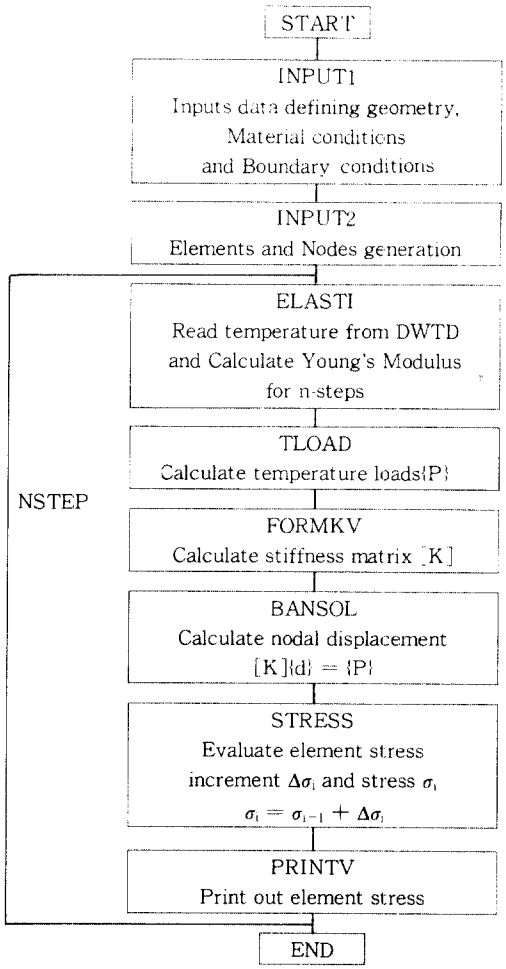

Fig. 3 Flow chart of thermal stress analysis by FEM

비교를 하는 것이 보다 합리적이지만, 2차원문제로 해석하여도 큰 무리가 없다는 자체 검토결과에 따라 온도응력계산시 작업의 편이성을 고려하여 2차원해석을 비교대상으로 정하였다. 2차원 해석시의 유한요소 분할도는 4.1절의 Fig. 8에 나타나 있다.

3.1 ADINA-T의 해석결과와의 비교

대상구조물의 중앙부(표면으로부터 약 47cm 떨어진 위치)와 표면부(표면으로부터 약 17cm 떨어진 위치)에 대한 본 해석프로그램에 의한 해석치와 ADINA-T에 의한 해석치를 Fig. 4에 나타냈다.

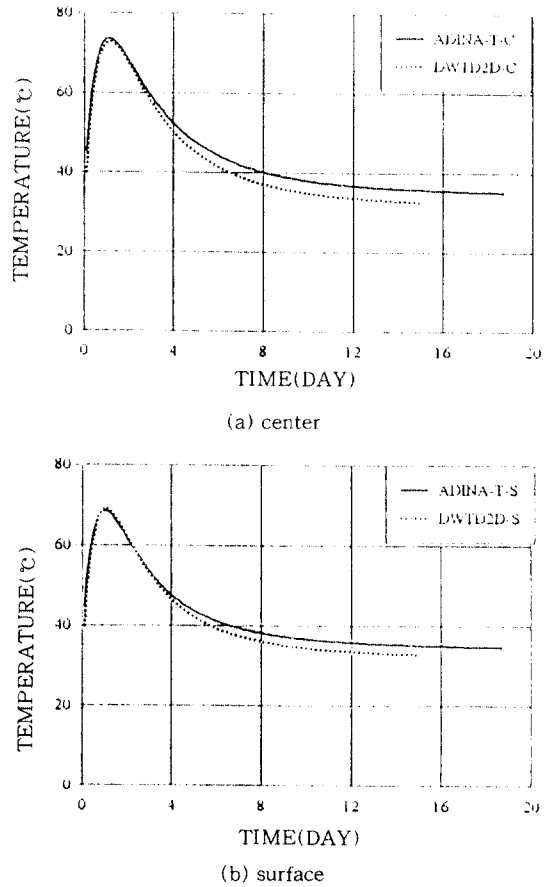

Fig. 4 Comparison of result from ADINA-T and this study

그 결과 ADINA-T에 의한 해석결과와 본 연구에서 개발한 프로그램의 해석결과는 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.2 ADINA의 해석결과와의 비교

본 연구에서 프로그램의 검증을 위해서 사용한 ADINA프로그램은 구조해석분야에서는 보편적으로 사용되고 있는 프로그램으로서, 그 해석정도에 대해서는 충분히 입증이 되어 있다. 그러나 ADINA프로그램은 재령변화에 따른 탄성계수의 입력이 곤란하고, 입력데이타로서 해석하고자 하는 재령에서의 온도와 초기온도와의 온도차가 입력되기 때문에 온도차가 거의 없어지는 재령에 도달하면 Fig. 5와 같이 온도응력도 0이 되어버린다.

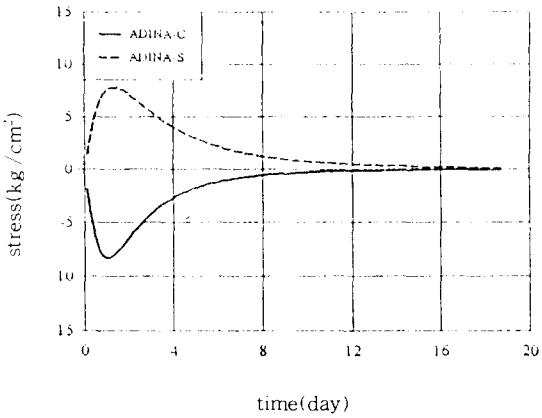

Fig. 5 Thermal stress analysis by ADINA

그러나 온도응력은 시간이 경과하여도 0으로 수렴되는 것이 아니라 잔류응력으로서 어느 일정한 크기로 구조물내에 잠재하고 있기 때문에,[14] ADINA프로그램으로는 매스콘크리트와 같이 초기재령시에 탄성계수가 크게 변하는 경우에는 실제의 응력상태를 정확히 평가할 수가 없다.

이러한 문제점 때문에 ADINA를 이용해 온도응력을 계산하는 것은 사용자 정의가 가능한 별도의 서브루틴을 사용한다면 계산이 전혀 불가능한 것만은 아니지만, 사용법이 매우 복잡하고 불편하기 때문에 거의 사용을 하지 않고 있다.[15,16]

본 연구에서는 ADINA에 의한 계산치를 별도의 사용자 정의없이 간단하게 온도응력을 계산할 수 있는 방법을 구상하여 개발한 프로그램의 검증에 사용하였다.

온도응력계산에 사용한 온도데이타는 본 연구에서 개발한 온도응력해석 프로그램과의 보다 정확한 비교를 위하여, 양자 모두 ADINA-T에서 계산한 출력물을 사용하였으며, 콘크리트의 탄성계수 산정을 위해서는 적산온도개념을 도입하여 岡田의 적산온도식[17]을 사용하였고 크리프의 영향은 고려하지 않았다.

ADINA를 이용한 온도응력의 계산방법을 정리하면 다음과 같다.

i) ADINA의 계산결과를 증분법의 형태로 바꾸기 위하여 ADINA-T에 의해서 i재령에 대해서 계산된 T_i를 이용하여 계산한 온도응력 σi로 부터 i-1재령에서 T_{i-1}에 대해서 계산한 온도응력σi-1을 빼서 두 재령간의 온도응력차 $\Delta\sigma_i$를 전체의 재령에 대해서 각각 계산한다.

ii) 온도응력 계산에 사용되는 콘크리트의 탄성계수는 ADINA에서는 전체의 재령에 대하여 일정하게 입력하도록 되어 있으므로, 작은 수치로 가정하여 입력한 후 나중에 각 재령에 대하여 환산을 한다. 이 때에 탄성계수의 계산을 위해서는 적산온도식을 이용한다.

iii) i)에서 계산한 $\Delta\sigma i$의 값에 ii)에서 계산한 중앙부의 탄성계수를 곱해 $\Delta\sigma_i$를 재계산한다.

iv) 각 재령마다의 $\Delta\sigma_i$를 계산하여 식(12)와 같이 계산하고자 하는 재령까지 합산하여 임의의 재령에서의 온도응력σi을 계산한다.

단, iii)의 계산과정에서 구조물내의 탄성계수는 표면부와 중앙부는 약간의 차이가 있지만, 검토결과 온도응력에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었기 때문에 일률적으로 중앙부의 탄성계수값을 사용하였다. 보정한 결과는 Fig. 6과 같다.

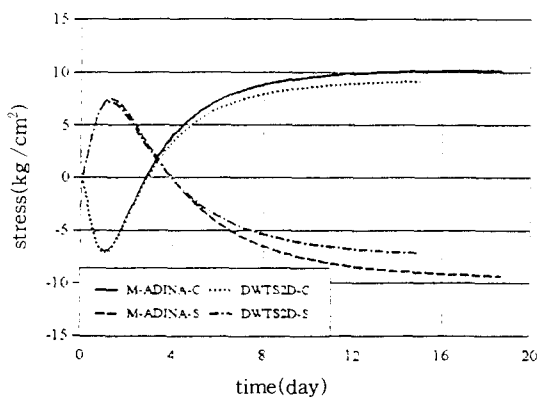

Fig. 6 Modified thermal stress analysis by ADINA

Fig. 6에 의하면 ADINA에 의한 해석결과는 약간의 보정작업이 필요하기는 하지만, 본 연구에서 개발한 프로그램의 해석결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4. 실구조물에 대한 해석치와 실험치의 비교

4.1 내부구속이 강한 구조물

1) 대상구조물

해석대상은 Fig. 7과 같이 부재크기가 2.5m×2.5m×1.0m인 매스콘크리트 구조물이며, 구조물의 좌우편방향으로는 온도변화가 없도록 하기 위해서 실험체의 좌우편에 두께 40cm의 단열재를 설치하여 온도발산을 막았다.

본 구조물은 본래 14.0m×2.5m×12.0m인 벽체 구조물의 1회 타설높이를 1.0m로 가정했을 경우의 온도 및 온도응력 분포를 검토하기 위하여 부재 최소칫수를 고려하여 예비실험용으로서 제작한 매스콘크리트 구조물이다. 구조물 내부에는 해석치와의 비교를 위해 열전대와 유효응력계를 설치하여 온도 및 온도응력을 측정하였다.

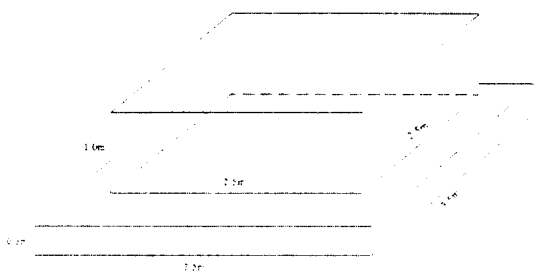

Fig. 7 Test specimen

실측치와의 비교를 위해서는 대상구조물에 대해서 2차원, 3차원해석을 동시에 실시하여 실측치와 비교를 하였고, 2차원 해석시에는 대칭성을 고려하여 1/2 크기에 대해서만 해석을 실시하였고, 3차원 해석시에는 1/4 크기에 대해서 해석을 실시하였다. 해석시의 온도의 경계조건으로서는 중앙부분은 단열경계로 해석하였으며, 콘크리트의 노출면은 열전달경계로 하였고 우측의 단열재가 설치된 부분은 단열재의 열전달률을 입력시켰다. 또한 하부는 고정온도 경계조건을 두어 해석을 실시하였다.

유한요소해석시의 대상구조물에 대한 2차원, 3차원 요소분할도는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

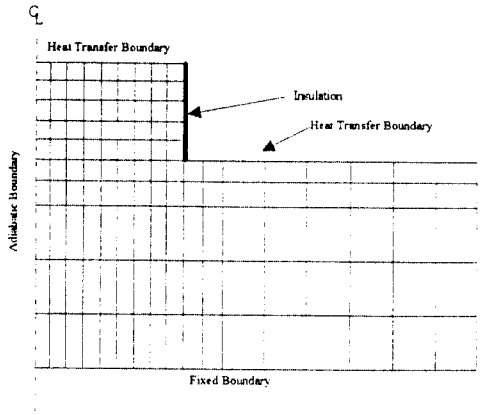

Fig. 8 Two dimensional finite element mesh

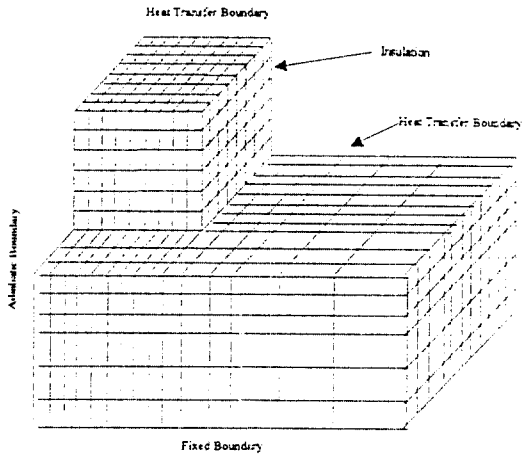

Fig. 9 Thress dimensional finite element mesh

2) 해석에 사용한 재료특성치

콘크리트 타설시의 타설온도는 32℃였으며, 해석시의 외부기온은 콘크리트 타설시의 1일 평균기온으로 해서 해석을 실시하였다.

콘크리트의 단열온도상승식은 식의 간편성 때문에 일반적으로 塚山의 제안식을 기본으로 하는 식(13)과 같은 two- parameter식이 많이 사용되지만, 이 식은 Fig. 10에서도 알 수 있는 바와 같이 초기의 발열상태를 실제보다 크게 평가하고 있기 때문에, 초기의 응력상태를 과대평가할 가능성이 있어 이 식보다 실제의 값에 보다 가깝게 묘사할 수 있는 three- parameter식을 사용하였다.

$$Q = K(1-e^{-\alpha t}) \quad (13)$$

$$Q = K(1-e^{-\alpha t^{\beta}}) \quad (14)$$

단열온도상승식의 실험정수는 Table 1과 같다.

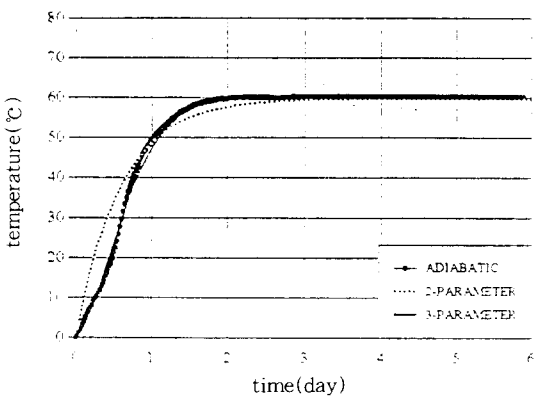

Fig. 10 Adiabatic curve

Table 1 Adiabatic parameter

	two-parameter	three-parameter
K	60.98	60.98
α	1.39	1.65
β	1.73	

그 밖에 수화열해석에 사용한 제정수는 Table 2와 같다.

Table 2 Material properties

	concrete	rock
thermal conductivity (kcal/mh℃)	1.94	1.94
heat transfer (kg/m²h℃)	10.0	10.0
specific heat (kcal/kg℃)	0.24	0.25
thermal expansion (/℃)	10^{-5}	10^{-5}
density (kg/m³)	2300	1700
Poisson's ratio	0.167	0.200

온도응력 해석시에는 온도응력이 L/H와 하부 구속체의 탄성계수의 영향을 많이 받기 때문에 그 영향이 없도록 하기 위해서 상부 피구속체의 5배 크기로 모델링을 하였으며, 해석은 3시간 간격으로 실시하였다. 또한, 하부 구속체의 탄성계수는 콘크리트를 비닐을 깐 아스팔트위에 타설하였기 때문에 구속체의 탄성계수는 거의 무시할 수 있는 상태가 되어 있기 때문에 1,000kg/cm²으로 가정하였다. 콘크리트의 탄성계수 산정시 적산온도식은 식(15)~식(18)과 같은 岡田의 식[17]을 사용하였으며, 크리프의 영향은 CEB-FIP 1990 모델식을 사용하여 고려하였다.

$$M(t) = \sum(\Delta T + 10)\,\Delta t \quad (15)$$

$$\sigma_c(t) = 487\log_{10}(24M(t)) - 1300 \quad (M \leq 1000) \quad (16)$$

$$\sigma_c(t) = 244\log_{10}(24M(t)) - 570 \quad (M > 1000) \quad (17)$$

$$E_c(t) = 15{,}300\sqrt{\sigma_c(t)} \quad (18)$$

여기서 $M(t)$: t재령에서의 적산온도

ΔT : t재령과 그 전재령과의 온도차

Δt : t재령과 그 전재령과의 시간차

$E_c(t)$: t재령이 경과된 콘크리트의 탄성계수

3) 온도에 대한 실측치와 해석치의 비교

실험체의 중앙부와 표면부에 매설한 열전대에 의해 측정된 온도 실측치와 본 연구에서 개발한 2차원, 3차원 수화열해석 프로그램에 의한 해석치와 비교한 결과는 Fig. 11과 같다.

해석결과, 두 해석치 모두 실측치를 잘 평가하고 있는 것으로 나타났으며, 2차원해석결과와 3차원해석결과도 양자사이에 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 일률적으로 말하기는 곤란하지만, 구조물의 L/H(길이와 높이의 비)가 작고 두께방향으로의 열방출량이 높이방향에 비해 훨씬 적기 때문에 2차원과 3차원의 해석결과가 비슷하게 나타난 것으로 사료된다.

4) 온도응력에 대한 실측치와 해석치의 비교

실험체에 설치한 유효응력계에 의해 측정된 온도응력 측정치와 2차원, 3차원 온도응력해석한 결

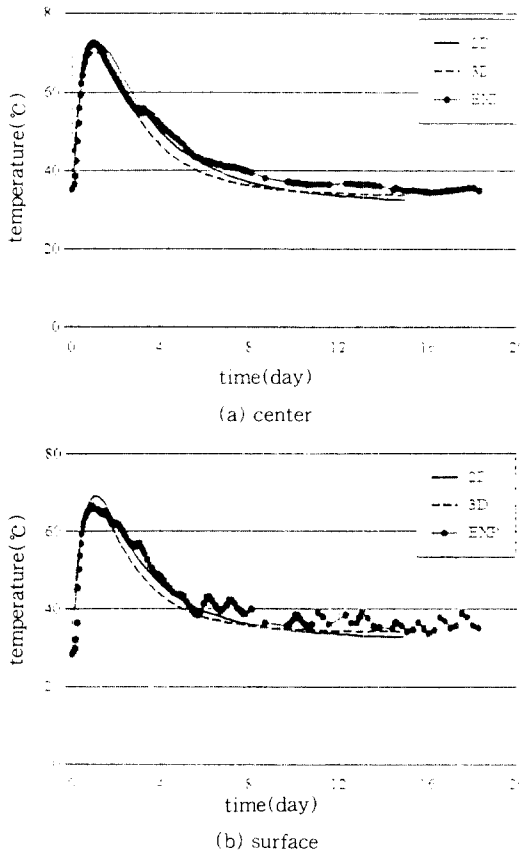

Fig. 11 Measured temperature vs. calculated value by FEM

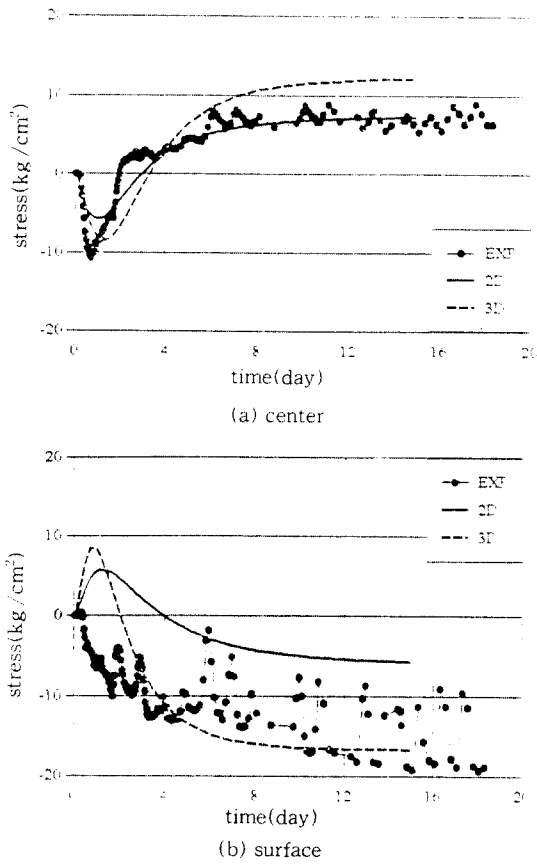

Fig. 12 Measured thermal stress vs. calculated value by FEM

과를 Fig. 12에 나타냈다.

해석결과를 보면 중앙부는 2차원, 3차원해석 모두 실측치를 잘 평가하는 것으로 나타났으며, 특히2차원 해석결과가 오히려 실측치에 약간 가까운 것으로 나타났고, 표면부는 오히려 3차원 해석결과가 실측치에 가까운 것으로 나타나, 양자간에 위치에 따라 다소 차이를 보이고 있으나, 전체적인 응력변화 양상은 잘 평가하는 것으로 나타났다. 그러나 특히 표면부의 경우, 해석상으로는 양자 모두 초기에 인장응력을 나타내다가 압축응력으로 바뀌는데 반해, 실측치에서는 거의 인장응력을 나타내지 않고 곧바로 압축응력을 나타내어 해석치와 실측치 사이에는 약간의 차이를 보이고 있으며, 두 해석결과간에도 차이를 보이고 있다. 그 이유로서는 본 해석시스템에서는 해석이 곤란한 자기수축[18]과 건조수축의 영향등이 중앙부보다는 표면부에 더 크게 복합적으로 나타난 것이 아닌가 생각한다. 현재로서는 이 분야에 대한 연구가 미비한 상태이지만, 온도응력 평가시 이 분야에 대한 정식화가 이루어진다면 실제의 응력상태에 보다 가까운 해석이 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 외부구속이 강한 구조물

1) 대상구조물

해석대상은 Fig. 13과 같이 부재크기가 14.0m×2.5m×0.5m인 벽체구조물로서, 본래 하부가 고정되어 있는 경우는 0.5m인 경우에도 매스콘크리트로 가정할 수 있기 때문에 이것을 대상구조물도 선정하였다. 본 해석구조물은 4.1절에서 다룬 구조물의 실구조체로서 당초 타설높이를 1.0m로

설정하였으나, 하부구속의 영향 때문에 타설높이를 0.5m로 줄여 타설하게 되었다.

콘크리트 타설은 바닥면으로부터 0.25m 떨어진 높이부터 0.5m를 타설하고, 1주일이 경과한 후 그 위에 다시 0.5m를 타설하여 상부에 타설한 콘크리트가 하부에 타설한 콘크리트에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

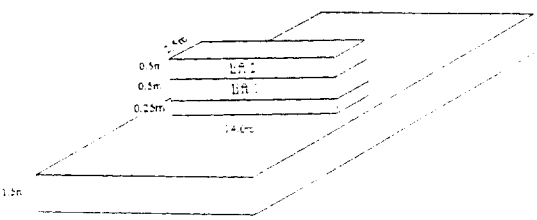

Fig. 13 Test specimen

구조물에 대해서는 해석치와의 비교를 위해 구조물의 중앙부에 열전대와 유효응력계를 설치하여 온도 및 온도응력을 측정하였다.

실측치와 해석치의 비교에 있어서는 구조물의 형상이 2차원해석으로도 충분하다고 판단되어 2차원해석만 실시하였으며, 해석시에는 대칭성을 고려하여 1/2 크기에 대해서만 해석을 실시하였다.

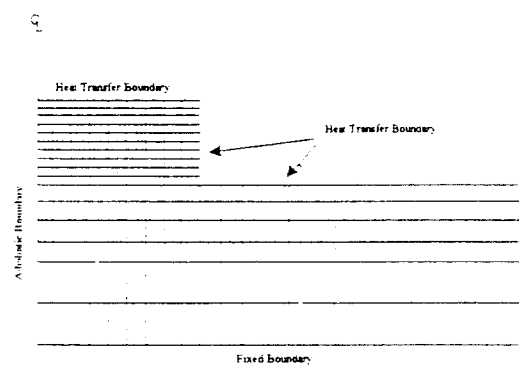

Fig. 14 Finite element mesh

유한요소해석시의 대상구조물에 대한 2차원 요소분할도는 Fig. 14와 같다.

2) 해석에 사용한 재료특성치

수화열해석시에는 열경계조건 및 재료특성치는 4.1절의 해석예와 동일한 값을 사용하였으며, 콘크리트 타설온도는 12℃였다.

또한 콘크리트의 단열온도상승식은 타설온도가 다른 관계로 4.1 절에서 사용한 값을 그대로 사용할 수가 없어 새로이 단열온도상승시험을 통해 계수를 결정하였다.

Table 3 Adiabatic parameter

	three-parameter
K	46.55
α	1.34
β	1.25

또한 온도응력 해석시는 하부에 이미 타설한 콘크리트위에 새롭게 타설되기 때문에 구속체의 탄성계수는 경화된 콘크리트의 탄성계수값인 300,00kg /cm^{2}을 사용하였다.

3) 수화열 해석 결과의 비교

수화열해석한 결과와 열전대를 이용하여 실측한 값을 Fig. 15에 나타내었다.

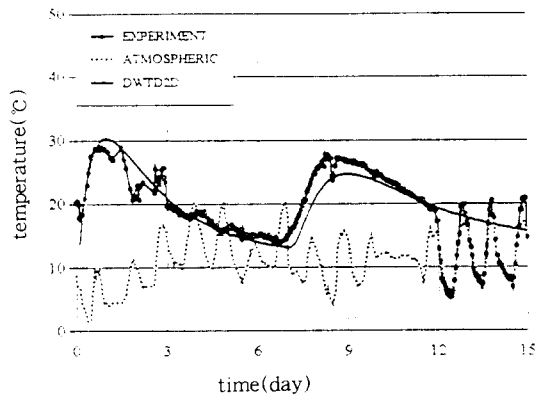

Fig. 15 Measured temperature vs. calculated value by FEM

해석결과, 실측치는 타설높이가 0.5m인 관계로 외부기온의 영향을 많이 받아 부분적으로 해석치와 일치하지 않는 부분도 있지만, 전체적으로 실

측치를 잘 평가하고 있으며, 특히 내부온도가 식어 외부기온과 거의 같아진 시점에서 상부에 새롭게 타설한 콘크리트의 수화발열현상에 의해 일시적으로 다시 온도가 상승하는 현상을 잘 묘사해 주고 있었다.

3) 온도응력 해석 결과의 비교

실구조체에 설치한 유효응력계에 의해 측정된 값과 해석결과를 비교한 결과를 Fig. 16에 나타냈다.

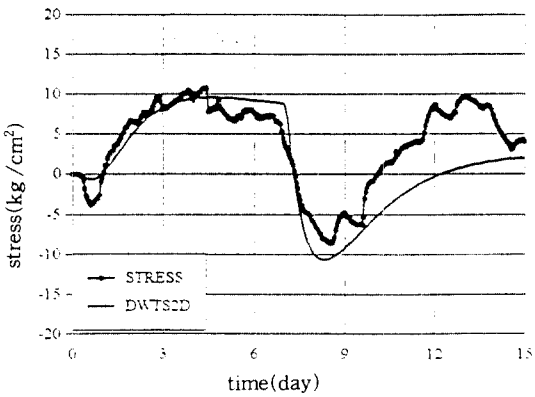

Fig. 16 Measured thermal stress vs. calculated value by FEM

이 해석결과에 의하면 구조물의 내부 온도응력은 초기에는 압축응력을 나타내다가 약 3일이 경과한 시점에서 인장응력으로 바뀌고, 1주일이 경과하여 새로운 콘크리트를 타설한 시점에서는 열원이 상부에 있는 경우와 마찬가지이므로 온도응력의 증분이 압축응력을 나타냈다가 다시 인장응력으로 바뀌는 상태를 잘 평가하고 있음을 알았다.

따라서 본 연구에서 개발한 프로그램은 콘크리트를 연속타설 하는 경우에도 온도응력의 변화양상을 비교적 잘 평가하고 있음을 알았다.

5. 결 론

본 연구에서는 해석적으로 온도응력을 검토하기 위하여 수화열 및 온도응력 해석용 프로그램을 개발하여 실구조물에 설치한 게이지에 의해 측정한 실측치와 비교검토를 하였다. 연구결과 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서 개발한 수화열해석 프로그램의 해석결과와 ADINA-T에 의한 해석결과는 잘 일치하며, 양자 모두 구조물내의 온도분포를 잘 평가하고 있음을 알았다.

2) 수화열 해석에 있어서는 2차원, 3차원에 대해서 동시에 해석한 결과, 2차원, 3차원 모두 실측치를 잘 평가하고 있었으며, 두께방향으로의 온도변화가 적을 경우에는 해석결과사이에 별로 차이가 없음을 알았다.

3) 본 연구에서 개발한 온도응력해석 프로그램의 해석결과는 ADINA의 해석치를 증분법으로 바꾸어 해석한 결과와 잘 일치하였으며, 온도응력에 대한 실측치와의 비교에 있어서도 잘 평가하고 있는 것으로 나타났다.

4) ADINA를 이용한 온도응력 해석방법도 해석결과에 대해서 약간의 수정이 필요하지만, 온도응력의 양상을 파악하는데는 충분히 사용할 수 있음을 알았다.

참 고 문 헌

1. 吉岡保彦, 米澤敏男, 丹原利夫, マッシブなコンクリート部材に生じる拘束應力とひびわれに關する研究(その1) 竹中技術研究報告, 第21號, 1979. 4, pp.72 -80
2. 大崎幸雄, 吉川弘道, 河田秋澄, マスコンクリートの溫度應力解析に適用する構成方程式の檢討, 第1回マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 日本コンクリート工學協會, 1982. 9, pp.49-56
3. 田邊忠顯, マスコンクリートの溫度應力制御技術の現狀 日本土木學會論文集, No.372/V-5, 1986. 8, pp.1-16.
4. 長田晴道, 小野定, 溫度解析方法に關する既往の研究成果について, 第1回マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに關するコロキウム論文集, 日本コンクリート工學協會, 1982. 9, pp.35-44.
5. 김진근, 이종대, "크리이프를 고려한 매스콘크리트의 수화열에 대한 온도응력 해석," 대한토목학회논문집, 제14권 제4호, 1994년 7월, pp.771-781
6. 오병환, 백신원, "대형콘크리트구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구," 한국콘크리트학회, 제17

권 1호, 1995.2, pp.97-108
7. 이장화, 변근주, "매스콘크리트 수화온도의 합리적 평가를 위한 실험 및 해석연구," 대한토목학회 논문집, 제15권 2호, 1995. 3, pp.337-346
8. 강석화, 정철헌, 정한중, 이용호, 박칠림, "매스콘크리트구조물의 온도응력평가에 관한 연구," 콘크리트학회지, Vol.7, No.2, 1995.4, pp.126-135
9. ADINA Engineering, ADINA-A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis. Report AE81-1, ADINA Engineering Inc., Watertown, MA(1981)
10. 矢川元基, 宮崎側幸,有限要素法による熱應力・クリ-プ・熱傳導解析, サイエンス社, 1985. 2.
11. Klaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice -Hall, New Jersey, 1982, pp 553-554
12. Bangash, Concrete and Concrete Structure: Numerical Modelling and Applications, Elsevier Applied Science, London and New York, 1989, pp.202-204
13. CEB-FIP Model Code 1990, 1991.6, pp.64-65
14. マスコンクリ-トの溫度應力委員會報告書, 日本コンクリ-ト工學協會, 1985. 11, pp.35-39
15. Nobuhiro Machida and Kazuo Uehara, "Nonlinear Thermal Stress Analysis of a Massive Concrete Structure," Computer & Structures, Vol.26, No.1 /2, 1987, pp.287-296
16. M. Ishikawa, "Thermal Stress Analysis of a Concrete Dam", Computer & Structures, 40, No.2, 1991, pp.347-352
17. 岡田淸, 小林和夫, 宮川豊章, 村本吉弘, "マスコンクリ-トの基本的特性に關する考察," セメント技術年譜, Vol.34, 1980, pp.230-234
18. 筋野晃司, 田澤榮一, 宮澤伸吾, 保明淳二, "マスコンクリ-トのひび割れ發生に及ぼす自己收縮の影響," コンクリ-ト工學年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995. 9, pp.1139-1150

(접수일자 : 1995. 5. 11)