

발열구명동의 착용에 의한 인체의 체온변화에 관한 수치해석

김명준*

* 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템공학전공

Numerical Analysis on Body Temperature Change with Heating Life Vest

Myoung-Jun Kim*

* Division of Power System Engineering, Kunsan National University, Kunsan, 573-701, Korea

요 약 : 본 논문은 해난사고에 의해 빈번하게 발생하는 저체온증으로 인한 인명손실을 최소화하기 위하여 개발된 발열구명동의 열적특성을 수치해석을 통해 조사한 것으로, 계산에 이용된 주된 파라미터는 계절에 따른 수온, 구명동의 발열량 및 발열시간이다. 이산화 및 차분방정식은 유한차분법을 이용하였으며, 컴퓨터를 이용한 계산을 위하여 매트캐드를 이용하여 프로그래밍을 작성하였다. 또한 본 논문은 서로 다른 물질들이 경계를 이루고 있는 복잡한 형태의 모델에 해당함으로 경계에 해당하는 부분의 열전도율은 열저항의 모델을 응용하여 인접한 셀들의 열전도율을 이용하여 계산하였다. 본 연구를 통하여 발열구명동의 열발생으로 인체의 온도를 높게 유지할 수 있음을 알았고, 겨울철을 제외하고 저체온증의 우려가 없음을 알았다. 또한 해난사고시 생존율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 발열구명동, 인체의 온도분포, 수치해석, 열전도, 저체온증, 유한차분법

Abstract : The characteristics of temperature profile around human body with heating life vest at sea were investigated in this paper. Especially, the temperature profile of human body was numerically calculated by finite difference method with Mathcad. The main parameters were seasonal mean sea water temperature, heating amount and heating duration time of heating life vest. In this paper, the boundary layer was composed by the difference matters, and the thermal conductivity was calculated with an adjacent cells using thermal resistance method. It was clarified that the body temperature was kept highly and the risk of death from hypothermia was reduced by wearing heating life vest.

Key Words : Heating life vest, Temperature profile of human body, Numerical analysis, Thermal conductivity, Hypothermia, Finite difference method

1. 서 론

최근 들어 해양레저산업의 발전과 동시에 주 5일제에 의한 여가생활의 폭이 넓어지고 있고 이와 더불어 해상 및 내수면에서의 안전사고도 빈번하게 발생하고 있다(양 등, 2006). 일단 해상에서 사고가 발생하면 해류의 이동 및 악천우, 야간 등의 조건에서는 구조에 큰 어려움을 겪게 되고, 크게는 인체의 체온이 급격히 떨어져 저체온증으로 인한 생명의 위험이 따르기도 한다. 따라서 안전사고 예방을 위한 안전장비 지원 및 착용이 중요하게 부각되고 있다.

일반적으로 저체온증은 체온보다 차가운 물속에 인체가 잠겨 있을 때(특히 섭씨 21[°C]이하의 찬물) 발생하고, 저체온증의 특징으로는 부정맥이 발생하며 중심체온이 35[°C]이하로 내려가면 심장, 뇌, 폐, 기타 생명에 중요한 장기의 기능이 저하되기

시작한다는 것이다(Samuelson, 1982).

Table 1에 저체온증으로 의심되는 여러 증상을 온도별로 구분하여 정리하였다(정, 1998).

바다에 잠겨있는 사람이 견딜 수 있는 평균시간은 해수온도가 -1[°C] 이하일 때 15분 미만, 4[°C]에서는 90분, 10[°C] 미만에서는 3시간, 16[°C]에서는 6시간 정도로 알려져 있다(이, 1977).

이러한 저체온증은 사전에 예방을 하는 것이 가장 효과적으로 알려져 있으며, 대책으로는 보온복 착용을 권장하고 있다.

저체온증 현상을 늦추기 위해서 현재 발명된 구명동의 중에는 석회석의 수분흡착에 따른 발열현상을 이용한 것이 있다. 이 발열구명동의는 중량 500g(열발생 30시간 지속)의 발열팩을 2개까지 삽입하여 최대 60시간까지 평균 50[°C] 정도의 발열이 지속되도록 개발되어 해난사고로부터 체온을 보존할 수 있다고 보고되고 있다(조와 오, 2007).

본 연구는 해상에서 사고가 발생했을 때 구조시간 내에 보다 안정된 상태로 구조되기 위한 일환으로 최근에 개발된 발열구

* 대표저자 : 정희원, mjkim@kunsna.ac.kr, 063-469-1849

명동의 열발생에 따른 체온의 변화를 수치계산을 통해 살펴본 것으로, 계산에 이용된 주된 파라미터는 계절에 따른 해수의 평균온도, 발열구명동의 발열량 및 시간을 사용하였다. 또한 발열구명동의 착용 및 미착용 시 인체의 온도 변화를 통해 시간에 따른 체온의 변화도 파악하고자 수치해석을 수행한 것이다.

Table 1. Symptoms of human body with temperature change

Body temperature [°C]	Symptom	Symptom grade
37→35	-Shivering and initially a feeling of intense cold. -The ability to perform complex work degradation.	1
35→33	-The continued violent vibrations. -Don't actively mind. -Show the forgetful symptoms.	2
33→31	-Reduces vibrations. -The muscle goes stiff. -Convulsions and irregular behavior. -Confused mind.	3
31→29	-Started to lose mind. -Can't adapt to the environment. -Continuously, coma and muscle stiffness and slow pulse and breathing.	4
29→26	-Without question to answer, falls unconscious state. -Irregular heart rhythm.	5
26 and below	-Lost heart and brain are not going controlled by breathing, edema and lung bleeding due to be killed.	6

2. 지배방정식 및 경계조건

본 연구에서는 수치해석을 위한 차분방법으로 유한차분법(Finite Difference Method; FDM)을 이용하였고 바닷물의 각 면의 경계조건은 계절별 해수온도의 평균값으로 하였으며, 구명동의 단위체적당 발열량은 시간의 함수로써 수식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$Q_{vest} = \frac{L_{ads} \cdot \rho_{vest}}{hour_{vest}} \quad (1)$$

여기서, Q_{vest} : 발열구명동의 체적당 발열량[watt/m³], L_{ads} : 석회석의 흡착에 의한 발열량[kJ/kg], ρ_{vest} : 구명동의 밀도[kg/m³], $hour_{vest}$: 발열구명동의 열발생 지속시간[hr]을 각각 의미한다.

Fig. 1은 수치계산을 수행하기 위한 모델을 나타내고 있으며 이러한 모델을 이용해 계산 격자(39×39) 및 계산범위를 Fig. 2와 같이 설정하였다. 인체의 형상은 계산의 편의를 도모하기 위해 사각형의 단면으로 나타내었으며(2차원 해석), 경계조건은 해수의 계절별 평균온도인 등온조건으로 하였다. 그리고 해수면과 공기층 사이에 존재하는 인체의 얼굴부분에서 발생하는 열의 이동은 무시하였다.

본 계산에 적용한 열전달 지배방정식은 참고문헌(Frank et al, 2001; Holman, 2001; Frank and David, 1996)으로부터 정리하였으며, FDM을 이용해 수치계산의 유효성을 검토하기 위해 참고문헌(岩井 등, 2005)의 예제 문제를 해석해 본 결과, 참고문헌의 결과 값과 동일한 값을 얻을 수 있었다. 이러한 것로부터 본 계산에 적용한 지배방정식 및 수식(2)에 나타난 이산화방정식을 충분한 타당성을 가지고 있다고 할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (2)$$

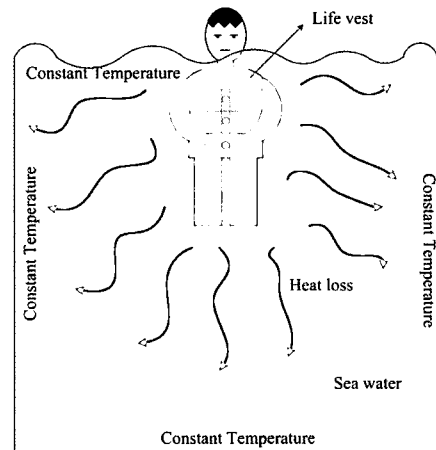


Fig. 1. Schematic of numerical analysis model.

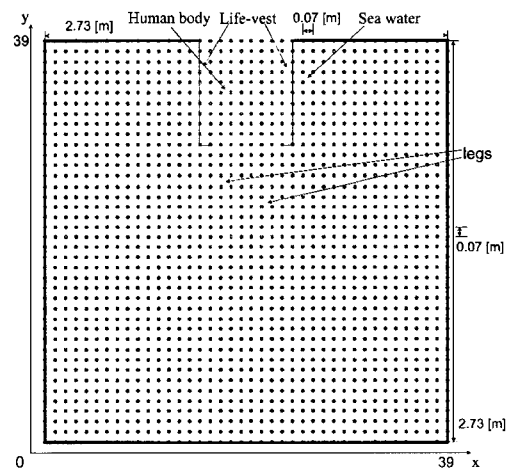


Fig. 2. Calculation grid and human body.

여기서, k : 열전도율[watt/m·K], Q : 단위체적당 발열량 [watt/m³], T : 온도[°C]를 각각 의미한다.

수치해석을 위해 지배미분방정식을 FDM을 이용하여 이산화를 수행하면 수식(3)과 같은 차분방정식을 얻을 수 있다.

$$T_{i,j} = \frac{\frac{k_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} T_{i+1,j} + \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} T_{i-1,j}}{\frac{k_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}} + \dots$$

$$+ \frac{\frac{k_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} T_{i+1,j} + \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} T_{i-1,j} + Q_{i,j}}{\frac{k_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{k_{i+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \frac{k_{i-\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}} \quad (3)$$

여기서, i, j : index[-], Δx : x방향의 간격[m], Δy : y방향의 간격[m], T : 온도[°C]를 각각 의미하고, 수식 (3)에 사용된 격자점의 열전도율은 해수와 구멍동의, 그리고 인체가 서로 접하는 부분들이 존재하기 때문에 아래의 수식(4)와 같이 인접한 격자점의 열전도계수를 서로 결합하여 계산하였다.

$$k_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_{i+1}}} \quad (4)$$

본 연구에서 있어 컴퓨터를 이용한 연산은 Mathcad(Ver.13)를 이용하여 계산하였으며 계산의 수렴조건은 아래의 수식 (5)와 같다.

$$\left| 1 - \frac{T_{i,j}^n}{T_{i,j}^{n-1}} \right| < 10^{-4} \quad (5)$$

여기서, i 및 j 는 x 방향 및 y 방향에 해당하는 격자점의 위치를 의미하고, n 은 계산의 반복횟수를 의미한다.

Table 2. Initial and boundary conditions of numerical analysis condition

Section	Average temperature [°C]		Heating hour [hr]
Season	T_{spr}	15	X
	T_{sum}	23	
	T_{aut}	13	
	T_{win}	5	
Life vest	$T_{vest} : 40, 50, 60$		$hour_{vest} : 20, 40, 60$

본 연구에서는 인체의 온도에 영향을 미치는 주된 인자로, 계절별 해수의 평균온도 및 발열체의 발열시간(기상청, 2008)을 이용하여 계산을 수행하였다(Table 2). 따라서 실제의 경우에는 인체의 온도변화가 시간에 따른 함수로 나타나는 비정상상태의 계산을 수행하여야 하지만, 전술한 바와 같이 발열구멍동의 발열시간을 함수로 정의하였기 때문에 인체의 온도는 주어진 발열시간 동안의 정상상태조건으로 가정하여 계산하였다.

여기서, T_{spr} : 봄철의 해수평균온도[°C], T_{sum} : 여름철의 해수평균온도[°C], T_{aut} : 가을철의 해수평균온도[°C], T_{win} : 겨울철의 해수평균온도[°C], T_{vest} : 구멍동의 내부평균온도[°C], $hour_{vest}$: 구멍동의 발열지속시간[hr]을 각각 의미한다.

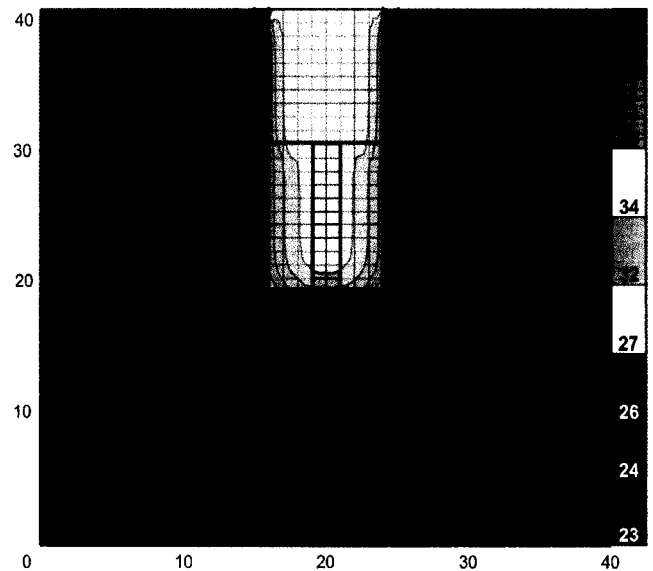
3. 수치해석 결과

3.1 발열구멍동의 착용 및 미착용에 의한 영향

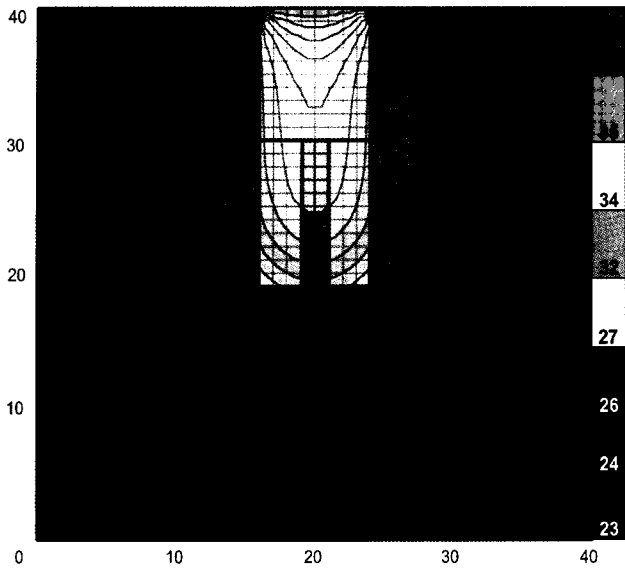
Fig. 3은 발열구멍동의를 착용한 경우 및 착용하지 않은 경우의 수치해석 결과를 나타낸 것이다.

동온선그래프로부터 알 수 있는 바와 같이 발열구멍동의를 착용한 경우(Fig. 3(a))의 열이동은 인체 및 해수로의 양방향으로 이루어지고 있으며, 인체의 상반신에 해당하는 부분의 온도가 34[°C]정도로 Fig. 3(b)에 나타낸 구멍동의를 착용하지 않은 경우의 계산결과와 비교해 약 2[°C]정도 높게 유지되고 있음을 알 수 있고, 이 결과로부터 발열구멍동의를 착용함에 의해 장시간 체온을 높게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

계산조건으로는 여름철 해수의 평균온도인 23[°C]를 수온으로 하였고, 인체의 초기온도는 36.5[°C]로 하였으며, 발열구멍동의의 열발생 지속시간은 60[hr]으로 하였다.



(a) With heat source life vest.



(b) Without life vest.

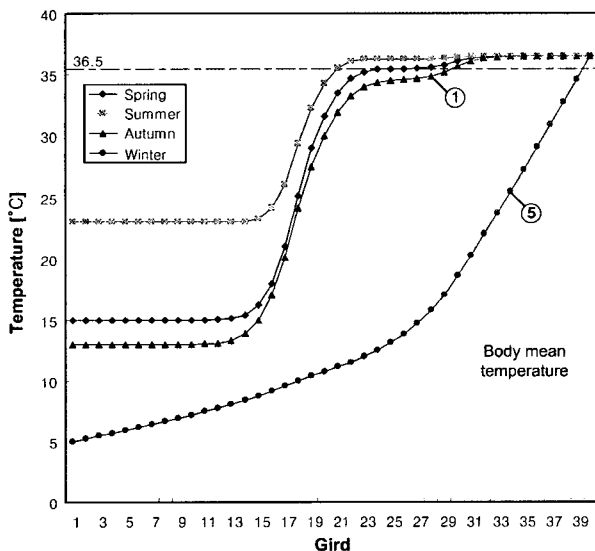
Fig. 3. Results of numerical analysis on temperature profile over human body.

3. 2 계절별 평균 수온에 의한 영향

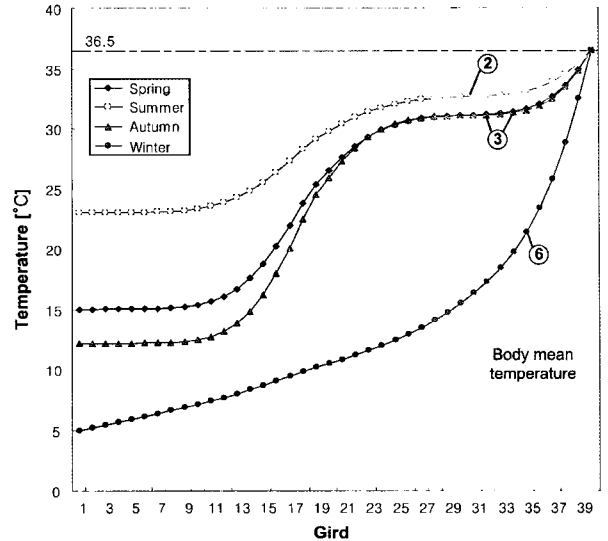
Fig. 4는 각 계절 간에 발열구멍동의의 열발생 지속시간을 40[hr]으로 하여 계산된 결과에서 인체의 수직단면에 해당하는 부분의 온도를 나타낸 그래프이다.

이 그래프로부터 알 수 있는 바와 같이 인체의 몸통부분(27 ≤ Grid ≤ 40)에 해당하는 온도가 해수온이 높은 조건인 여름>봄>가을의 순서로 체온이 높게 유지되고 있음을 알 수 있고, 전반적으로 안정된 온도 36.5[°C]로 유지되고 있음을 알 수 있다.

한편 겨울철 해수온도를 이용한 계산결과는 다른 계절에 비해 체온이 급격히 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는



(a) With heat source life vest.



(b) Without life vest.

Fig. 4. Results of numerical analysis on seasonal temperature change with human body.

인체의 발열량 및 발열구멍동의의 발열량에 비해 해수의 온도가 매우 낮아 열적평형을 유지하는 영역이 거의 존재하지 않기 때문으로 판단된다. 즉 해수와 인체와의 온도차이가 크게 되어 인체로부터 해수로의 열유속이 매우 증가하게 되어, 인체의 온도는 급격히 하강하게 된다.

Fig. 4(a), (b)중에 원문자로 나타낸 것은 계산결과에 따른 인체의 평균온도를 토대로 나타낼 수 있는 저체온증의 증상(Table 1)정도를 나타낸 것이다. 계산된 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 발열구멍동의를 착용함으로써 저체온증을 예방할 수 있을 뿐 아니라 체온을 높은 상태로 유지시킬 수 있어 해난사고 발생 후 안전한 상태로 구조될 수 있는 확률이 높아진다.

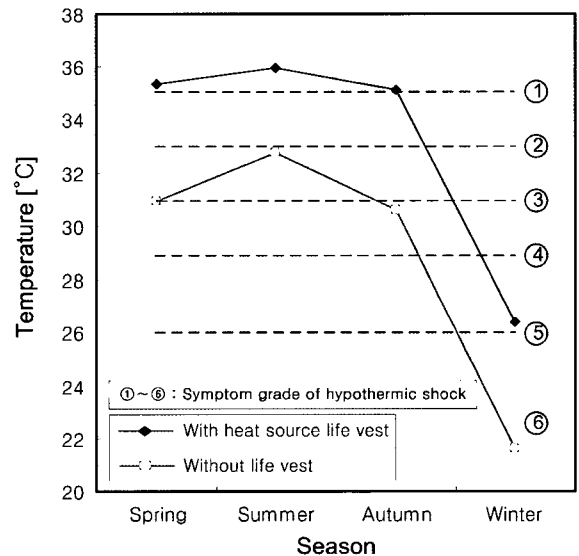


Fig. 5. Results of numerical analysis on mean human body temperature and symptom grade of hypothermic shock.

Fig. 5는 계절 간 수온변화에 대한 인체의 평균온도변화를 나타낸 것으로, 발열구명동의를 착용한 경우 겨울철을 제외하고는 저체온증의 증후가 전혀 나타나지 않지만 발열구명동의를 착용하지 않은 상태에서 해난사고를 당하면 계절을 막론하고 모든 상태에서 저체온증의 증후를 겪게 된다는 계산결과를 나타내고 있다. 특히 발열구명동의를 착용하지 않은 경우, 여름철을 제외하고는 저체온증의 증후가 심각하게 되는 3단계에 들어가 마비를 동반한 근육경련이 발생할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 해상에서 발생할 수 있는 해난사고 시 조난자의 생명을 보다 안전한 상태로 구조하기 위해 개발된 발열구명동의를 가상하여 각 계절별 수온에 따른 인체의 온도를 수치해석을 통해 계산한 결과, 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 발열구명동의를 열발생으로 인체의 온도를 높게 유지할 수 있음을 알았고, 발열구명동의를 착용한 경우 겨울철을 제외하고 저체온증의 우려가 없음을 알았다.

2) 발열구명동의를 착용으로 인해 해난사고시 인명구조에 의한 생존율을 높일 수 있을 것으로 예상되며, 나아가 내수면의 인명구조에도 영향을 미칠 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 2008년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] 기상청(2008), www.kma.go.kr
 [2] 양동신, 성철, 최태성(2006), REID 기술을 활용한 해양인명구조 시스템 개발에 관한 연구, 해양환경안전학회지, 추계학술대회, pp. 119-123.
 [3] 이동영(1977), 찬바다에서 인체의 생존가능시간, 공군본부 정훈감실, Vol.12, No.157, pp. 123-133.
 [4] 정인환(1998), [건강페이지] 철저한 대비로 시베리아기단 이기자 - 동상 저체온증 감기 낙상의 겨울철의 4대 질환 퇴치법, 동아사이언스 과학동아 12월호, pp. 110-113.
 [5] 조광진, 오종환(2007), [특허]구명조끼, 출원번호 1020660016047 (2006. 02. 20).
 [6] 岩井 裕, 大村高弘, 小林健一, 富村壽夫, 羽田光明, 平澤茂樹, 吉田英生(2005), エクセルとマウスでできる熱流体のシミュレーション, pp. 66-73.
 [7] Frank Kreith, Mark S., Bohn,(2001), Principles of Heat Transfer, THOMSON, 6th ed., pp. 70-75.
 [8] Frank P. Incropera, David P. Dewitt(1996), Funda-

mentals of Heat and Mass Transfer, School of Mechanical Engineering Purdue University, 4th ed., pp. 52-60.

[9] Holman J. P. (2001), Heat Transfer, McGrawHill, 8th ed., pp. 2-6.
 [10] Samuelson T. Doolittle W, Hawyard(1982), Hypothermia and cold water near drowning. Treatment guidelines., Alaska Med, 24, pp. 106-111.

원고접수일 : 2008년 06월 28일

원고수정일 : 1차 : 2008년 08월 01일

2차 : 2008년 09월 12일

게재확정일 : 2008년 09월 23일