

수화열에 의한 균열 저감 공법에 관한 연구

양주경^{1*}

Development of Reduction Methods of Thermal Stresses Due to Hydration Heat

Joo-Kyoung Yang^{1*}

요약 본 연구에서는 외기 온도의 변화를 반영하여 수화열에 의한 열전달 및 열응력 해석이 가능한 프로그램을 개발하고, 재료적 측면에서 수화열에 의한 균열 발생 가능성을 최소화하기 위하여 제5종포틀랜드시멘트를 사용하는 경우, 제5종포틀랜드시멘트와 플라이애쉬를 같이 사용하는 경우, 제5종포틀랜드시멘트와 강섬유를 같이 사용하는 경우를 실험하여 비교·검토하였다. 플라이애쉬를 대체하여 사용하면 콘크리트의 최고 온도를 낮추는 효과를 기대할 수 있지만, 인장응력의 감소 효과는 온도의 감소 효과만큼 크게 나타나지 않았다. 또한 강섬유를 혼입하여 사용하면 온도 및 인장응력의 저감 측면에서 매우 효과적인 것으로 나타났다.

Abstract In this paper, a program for simulating hydration heat and stresses was developed. And an effective methods were proposed for reduction of hydration heat stresses using flyash and steel fiber. It was shown that flyash replacement made reduction of peak temperature due to hydration heat. However, the effectiveness of reduction of tensile stress was not as good as it of peak temperature. Not only peak temperature but also tensile stress were reduced by the addition of steel fiber.

Key Words : flyash, steel fiber, peak temperature, tensile stress

1. 서론

콘크리트 내에서는 시멘트와 물의 화학적 반응으로 인하여 수화열이 발생하며, 콘크리트의 작은 열전도성으로 인하여 매스콘크리트 구조물의 내부와 표면부에서는 큰 온도차가 발생하게 된다[1,2]. 이러한 온도차로 인하여 콘크리트에는 온도응력이 발생하는데 온도응력이 콘크리트의 인장강도를 넘어서게 되면 균열이 발생하게 된다. 특히, 초기재령에서는 콘크리트의 인장강도가 작기 때문에 수화열에 의한 내외부의 온도차가 클 경우 균열이 발생한다. 수화열과 같은 체적변화를 수반하는 하중형태는 콘크리트 구조물이 구속되지 않아도, 즉 내부구속에 의해서도 균열이 발생할 수 있다. 또 지반과 의 마찰 등에 의해 매스콘크리트 구조물에 외적 구속이 가해지면 수화열에 의한 균열이 발생할 소지는 매우 높아지게 된다. 일반적

으로 콘크리트 구조물에서 수화열에 의한 균열은 시공 초기에 대부분 발생하며, 이러한 균열은 콘크리트 균열 원인을 잘 이해하지 못하고 시공단계에서 대책을 잘 수립하지 못하여 발생하는 경우가 대부분이다. 따라서, 균열의 발생 원인을 정확히 이해하여 시공단계에서 적절한 조치를 취한다면 콘크리트의 수화열에 의한 균열을 저감할 수 있다.

본 연구에서는 외기 온도의 변화를 반영하여 수화열에 의한 열전달 및 열응력 해석이 가능한 프로그램을 개발하고, 재료적 측면에서 수화열에 의한 균열 발생 가능성을 최소화하기 위하여 제5종포틀랜드시멘트를 사용하는 경우, 제5종포틀랜드시멘트와 플라이애쉬를 같이 사용하는 경우, 제5종포틀랜드시멘트와 강섬유를 같이 사용하는 경우를 실험하여 비교·검토하였다.

본 논문은 청운대학교 학술연구조성비와 GS건설(주)의 지원에 의해 수행되었음

¹청운대학교 철도행정토목학과 교수

접수일 08년 09월 05일

수정일 08년 10월 17일

*교신저자: 양주경(jkyang@chungwoon.ac.kr)

계재확정일 08년 12월 16일

2. 콘크리트의 열전달 특성

열해석을 위해 사용되는 등방성 재료의 비정상 열전도 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (1)$$

여기서, T : 온도 (°C)

λ : 열전도율(kcal/(m hr °C))

C : 비열(kcal/(kg °C))

ρ : 밀도(kg/m³)

\dot{Q} : 발열률(kcal/(m³ hr))

열전달에 의해 발생하는 열유속은 식 (2)를 사용하여 열전달 효과만을 고려하는 것이 일반적이다.

$$q = h(T - T_{sur}) \quad (2)$$

여기서, h : 외기대류계수(kcal/(m² hr °C))

T : 콘크리트 표면 온도(°C)

T_{sur} : 외기 온도(°C)

일반적으로 콘크리트 단열온도상승은 시멘트 종류, 단위 시멘트량 및 타설 온도 등에 따라 변하는 것으로 알려져 있다[3-6].

콘크리트의 외기대류계수에 대해서는 풍속의 영향만을 고려하여 산정하는 小澤[6]의 모델식을 사용하였다.

3. 콘크리트의 역학적 특성

콘크리트의 압축강도 발현율은 양생온도와 양생기간에 따라 달라진다. 양생온도와 양생기간의 영향을 고려하기 위해 숙성도 개념을 도입하는 연구가 다양하게 진행되고 있다[7-13]. 본 연구에서는 숙성도 개념을 도입하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 Ohzagi의 모델식[13]을 사용하였다.

일반적으로 많이 사용되고 있는 압축강도와 인장강도의 상관관계는 식 (3)과 같다.

$$f_t(t) = 0.396 \times (f_c')^{0.79} \quad (3)$$

여기서, $f_t(t)$: 28일 재령의 인장강도

f_c' : 28일 재령의 압축강도

온도가 탄성계수에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Bangash와 England[14,15]의 보정식을 사용하였다.

4. 실험 및 해석결과 분석

4.1 실험 방법

본 연구에서는 온도와 응력을 측정하였다. 온도응력은 무응력계과 유효응력계를 사용하였으며, 온도는 Thermocouple(K형)을 콘크리트 속에 매입하여 측정하였다.

데이터 측정은 최초 12시간은 3분 간격으로, 그 후 2.5일간은 1시간 간격으로, 그 후 7일간은 3시간 간격, 그리고 그 이후 10일은 6시간 간격으로 하였다.

4.2 시험체 제작

시멘트는 H사에서 생산하는 5종시멘트를 사용하였다. 사용된 잔골재와 굵은골재(최대크기는 25mm)의 성질은 각각 표 1과 표 2와 같다. 사용된 플라이애쉬의 성질은 표 3과 같고, 강섬유(번들타입)의 성질은 표 4와 같다.

[표 1] 굵은골재의 성질

실적율 (%)	조립률	0.08mm체 통과량 (%)	마모감량 (%)	밀도 (kg/m ³)
58.3	7.0	0.3	18.7	2770
흡수율 (%)	안정성 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	입자모양 판정 실적율 (%)	
0.46	3.3	1605	57.3	

[표 2] 잔골재의 성질

조립률	점토덩어리 (%)	염화물 (%)	흡수율 (%)	안전성 (%)
2.7	0.1	0.002	0.8	2.2
밀도 (kg/m ³)	0.08mm체 통과량 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	유기불순물	
2580	1.3	1645	표준색용액보다연함	

[표 3] 플라이애쉬의 성질

단위수량비 (%)	밀도 (kg/m ³)	분말도 (cm ² /g)	압축강도비 (%)	SiO ₂ (%)	강열감량 (%)	수분 (%)
101	2210	3614	91	58.3	3.6	0.2

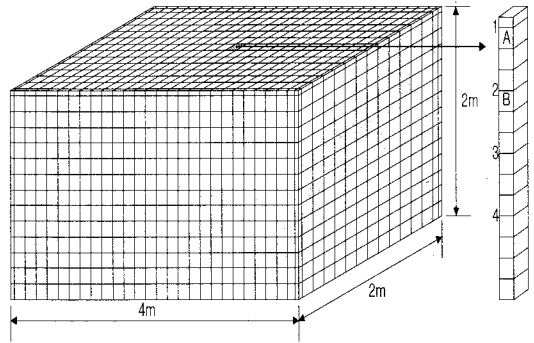
[표 4] 강섬유의 성질

직경 (mm)	길이 (mm)	밀도 (103kg/m ³)	탄성계수 (103kg/m ²)	인장강도 (kg/m ²)	파괴시 변형률 (%)
0.9	60	7.81	200	12,800	3.5

시험체를 제작하기 위하여 사용한 콘크리트의 배합은 표 5와 같다. 플라이애쉬를 사용한 배합에서 플라이애쉬의 대체량은 시멘트의 20%이고, 강섬유를 사용한 경우에는 강섬유를 20kg/m³를 첨가하였다.

[표 5] 시험체 제작에 사용한 배합

W/C (%)	s/a (%)	공기량 (%)	단위 재료량(kg/m ³)						
			W	C	F/A	S	G	AE감수제	강섬유
47.8	46.5	3.0	175	366	0	818	973	1.83	0
47.8	46.5	3.0	175	293	73	818	973	1.83	0
47.8	46.5	3.0	175	366	0	818	973	1.83	20



[그림 1] 해석 매쉬 모델링

콘크리트는 펌프카를 이용하여 2m 높이를 일시에 타설하였으며, 모든 모형시험체의 크기는 2m×2m×4m이다. 콘크리트의 다짐은 고주파 바이브레이터를 이용하였고, 거푸집은 시험이 완전히 마무리될 때까지 존치시켰다.

4.3 실험결과 및 분석

본 연구에서는 재령에 따른 압축강도와 할렬인장강도를 측정하였다. 표 6은 재령에 따른 압축강도와 쪼갠인장강도를 보여주고 있다. 5종 + 강섬유 보강법의 쪼갠인장강도 및 압축강도의 값이 다른 종류에 비해 높게 측정되었다.

[표 6] 재령에 따른 압축강도 및 쪼갠인장강도

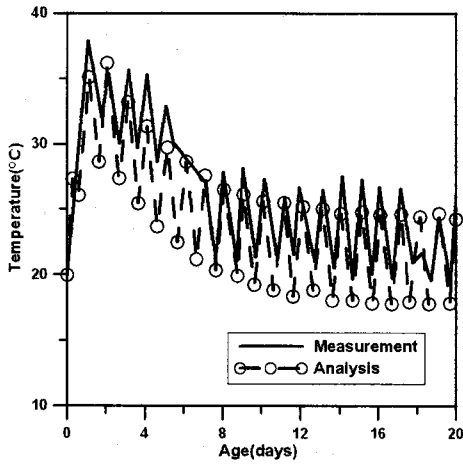
재령 (일)	5종		5종+F/A		5종+강섬유	
	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)
3	10.1	1.6	6.1	1.0	9.1	2.0
7	14.4	1.6	13.0	1.0	18.2	2.1
14	18.1	2.2	16.3	1.7	21.4	2.1
28	22.9	2.3	24.6	2.2	27.8	2.5

대상 구조물에 대한 3차원 해석을 실시하였으며, 경계조건을 결정할 때 측면의 네 면은 거푸집의 영향을 고려하였다. 모형시험체의 수화열에 의한 열전달 및 열응력을 해석하기 위하여 그림 1과 같은 매쉬 모델링의 형태를 취하였다. 해석에서 사용한 입력 데이터는 표 7과 같고 콘크리트의 하부는 지반으로 이루어져 있기 때문에 응력을 계산할 때 지반의 탄성계수를 고려하였다.

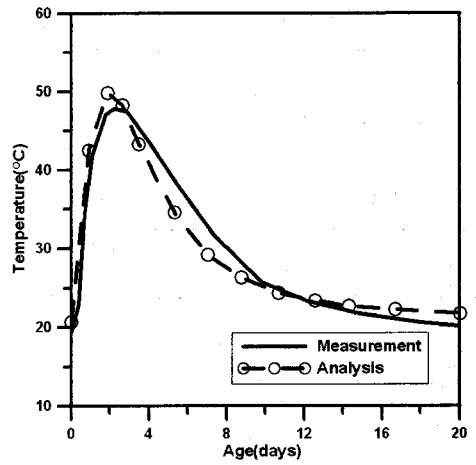
[표 7] 해석 입력 값

최대상승온도	5종시멘트	45.6℃
	플라이애쉬	38.3℃
	강섬유	45.6℃
반응속도	5종시멘트	0.818
	플라이애쉬	0.719
	강섬유	0.818
타설 온도	20℃	
암반층 온도	15℃	
대류계수	상부 : 10kcal/m ² ·hr·℃	
	측면 : 7kcal/m ² ·hr·℃	
열전도율	1.723kcal/m·hr·℃	

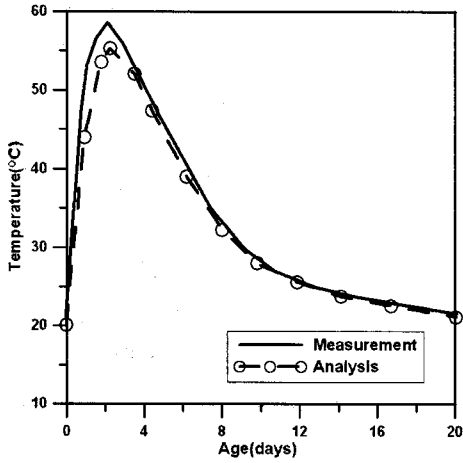
그림 2는 표면부에서의 온도변화를 보여주고 있다. 표면부는 외기온도의 변화에 민감하게 변화되고 있음을 알 수 있다. 그림 3~그림 5는 ③지점(모형체 중앙)에서의 온도변화를 나타낸다. 5종시멘트만을 사용했을 경우에서 최고온도 도달시점은 타설 완료 후 약 1.8일 정도이며, 최고온도는 59℃ 정도를 나타냈다. 5종시멘트만을 사용한 경우와 비교할 때, 플라이애쉬를 사용하면 5종시멘트만을 사용하는 경우보다 최고상승온도를 약 10℃ 정도 낮추는 효과를 나타냈다. 강섬유를 사용하면 5종시멘트만을 사용하는 경우에 비하여 콘크리트의 최고온도를 약 10℃ 정도 낮추는 효과를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 강섬유를 혼입함으로써 콘크리트의 열전도율이 상당히 증가되어 열전달이 원활히 이루어지기 때문인 것으로 사료된다.



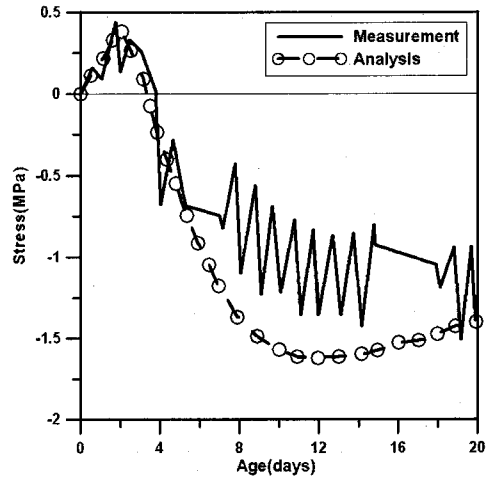
[그림 2] 표면부의 온도변화(5중시멘트)



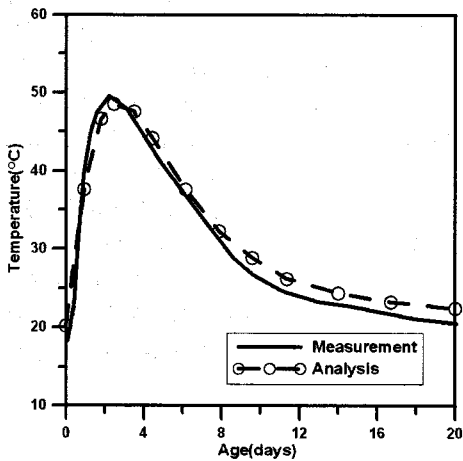
[그림 5] 중앙부의 온도변화(강섬유)



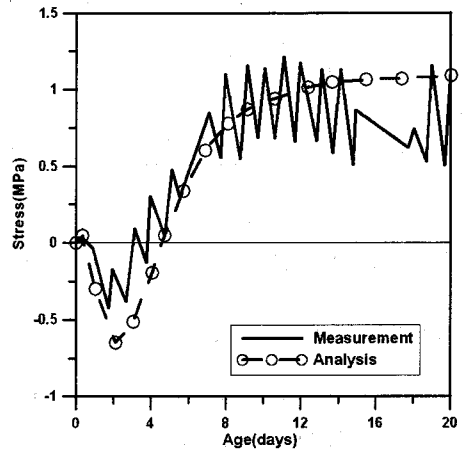
[그림 3] 중앙부의 온도변화(5중시멘트)



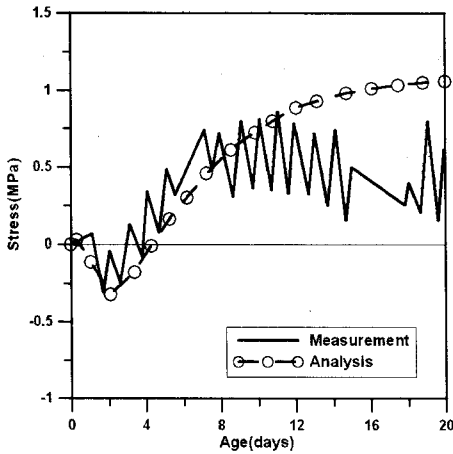
[그림 6] 표면부의 온도응력(5중시멘트)



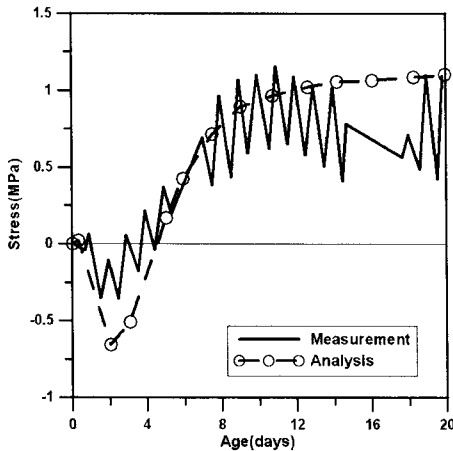
[그림 4] 중앙부의 온도변화(플라이애쉬)



[그림 7] B지점의 온도응력(5중시멘트)



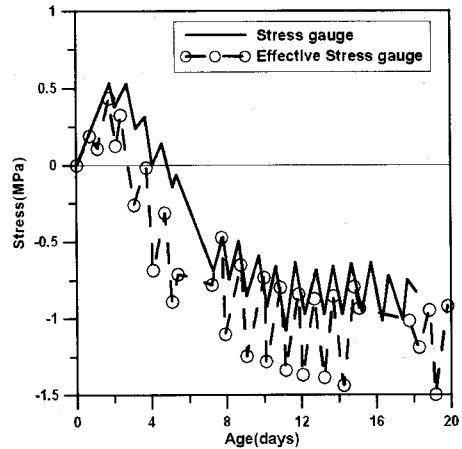
[그림 8] B지점의 온도응력(플라이애쉬)



[그림 9] B지점의 온도응력(강섬유)

그림 6~그림 9는 유효응력계에 의한 응력 계측결과와 해석결과를 나타낸 것이다. 계측결과로부터 나타난 온도응력의 변화양상을 살펴보면, 내부구속이 큰 매스콘크리트 구조물에서 흔히 볼 수 있는 전형적인 형태를 취하고 있음을 알 수 있다. 즉, 온도가 상승할 때는 내부의 온도 상승량이 표면부의 온도 상승량보다 커서 내부지점(B지점:표면에서 50cm 위치)은 압축응력을 받고 표면부(A지점)는 인장응력을 받는다. 하지만, 온도가 하강하면서 이러한 응력의 경향이 뒤바뀌게 된다. 플라이애쉬를 사용하면 5종시멘트만을 사용한 경우와 비교했을 때, A지점과 B지점에서의 인장응력의 크기도 약간 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 응력의 감소효과는 온도의 감소효과에 비해 작은 것으로 나타났다. 강섬유를 사용하면 5종시멘트만을 사용하는 경우에 비하여 콘크리트의 최고온도를 낮출 뿐만 아니라 내·외부 온도차를 감소시켜

표면부에서의 인장응력을 감소시키는 것을 확인할 수 있다. 따라서 강섬유를 혼입하면 응력의 감소효과를 가져올 뿐만 아니라 인장강도의 증진을 가져와 균열을 저감하는 측면에서도 매우 효과적인 것으로 판단된다.



[그림 10] 유효응력계와 무응력계의 측정결과(5종시멘트)

그림 10은 모형시험체의 표면부(A지점)에서 계측한 온도응력을 무응력계/변형률계를 이용한 경우와 유효응력계를 이용한 경우를 비교하여 나타낸 것이다. 무응력계/변형률계에 의한 측정치와 유효응력계에 의한 측정치가 비슷한 경향을 보이고 있으며, 특히 두 측정치 모두 외부 기온의 변화에 따른 온도응력의 변화를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

- (1) 본 연구에서는 유효응력계와 무응력계를 이용하여 응력을 계측하였다. 두 방법은 그 값이나 경향에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판명되었다. 따라서 무응력계를 이용하고 그 계측값에 적절한 보정을 가하면 고가의 유효응력계를 사용하지 않고도 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 생각된다.
- (2) 5종시멘트의 일부를 플라이애쉬로 대체하여 사용하면 콘크리트 내부의 최고온도를 크게 낮추는 효과를 기대할 수 있지만, 인장응력의 감소 측면에서는 온도의 감소효과만큼은 크게 나타나지 않았다.
- (3) 강섬유를 혼입하여 사용하면 온도 및 인장응력의 저감 측면에서 매우 효과적이고, 인장강도의 증가 측면에서도 효과적인 것으로 나타나 수화열에 의한 온도균열의 저감측면에서 매우 효과적이다.

참 고 문 헌

- [1] ACI Committee 207(1993), "Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete", (ACI 207.4R-93), ACI, Detroit, 22pp.
- [2] ACI Committee 207(1994), "Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, part 1, 207.1, pp. 21.
- [3] 塚山陸一(昭和 49년), "マツシフ"鐵筋コンクリートの溫度上昇ならびに溫度ひび割れに関する基礎研究", 東大學位論文.
- [4] 日本コンクリート工學協會(1982), "マスコンクリートの溫度應力發生メカニズムに 關すコロキウム", pp.112.
- [5] 社團法人 日本コンクリート工學協會(1985), "マスコンクリートの 溫度應力研究委員會報告書", pp. 5~9.
- [6] 小澤章三(1962), "マスコンクリートの 初期ひび割れとそ防止對策に關する研(I)", 發電水力, No. 57.
- [7] Nurse, R.W.(1949), "Steam Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 1, No. 2, pp. 79-88.
- [8] Saul, A.G.A.(1951), "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", Magazine of Concrete Research, Vol. 2, No. 6, pp. 127-140.
- [9] Bergstrom, S.G.(1953), "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 5, No. 14, pp. 61-66.
- [10] Plowman, J.M.(1956), "Maturity and the Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 8, No. 22, pp. 13-22.
- [11] Chin, F. K.(1971), "Relation between Strength and Maturity of Concrete", ACI J., Vol. 68, No. 3, pp. 196-203.
- [12] Carino, N.J., Lew, H.S., and Volz, C.K.(1983), "Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method", ACI Journal, V.80, No.10, March-April, pp. 93-101.
- [13] 大崎幸雄 外(1985), "溫度ひびわれ發生危險度の簡易豫測手法", 間組研究年報, pp.99-108.
- [14] Bangash, Y., and England, G.L.(1980), "The Influence of Thermal Creep on the Operational Behavior of Complex Structure", International Conference on Fundamental Creep and Shrinkage, Lausanne, Switzerland.
- [15] Bangash, Y., M.Y.H.(1989), "Concrete and Concrete Structures : Numerical Modeling and Applications", Elsevier Applied Science.

양 주 경(Joo-Kyoung Yang)

[정회원]



- 1993년 8월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학박사)

<관심분야>

콘크리트 재료, 콘크리트 구조