

## 섬식 지하철역사내 화재시 연기제어에 관한 수치해석적 연구

# A Numerical Study on the Smoke Control in Center-Platform Type Subway Station Fires

이성룡\* · 유홍선†

Sung-Ryong Lee · Hong-Sun Ryou

### Abstract

In this study, numerical simulations were carried out to analyze the effect of the smoke extraction system and fire shutters in subway station fires using FDS 4.0. Subway station used in the experiment was 145 m long. Simulation results are validated by comparing with experimental results. Simulation results showed good agreement with experimental results within 10°C. 10 MW polystyrene was used as a fuel in the numerical prediction. Numerical predictions were performed in the center-platform type subway station in case of a kiosk fire. Temperature and CO concentration were lowered by the operation of smoke extraction system. But, the operation of fire shutters had little effect on temperature and CO concentration in the platform level.

**Keywords** : Subway station fire, Smoke movement, Smoke extraction, Fire shutter  
지하철역사화재, 연기거동, 배연, 방화셔터

## 1. 서론

급속한 경제의 성장과 인구가 증가함에 따라 세계의 많은 도시들은 지하철을 주요 교통수단으로 사용하고 있다. 또한 교통문제를 해결하기 위해 세계의 주요도시 들에서 지하철이 건설되고 있다. 지하철이 가지는 신속성, 안전성, 정시성, 효율, 저공해 발생 등의 장점으로 인해 대중교통의 주요수단이 되었다.

2003년 2월 18일 대구 중앙로역에서 방화로 인한 화재가 발생하여 192명이 사망하고 148명이 부상하는 대형참사가 발생하였다[1].

대구 중앙로역 화재를 통하여 지하철 역사내 화재 발생시 화재발생 사실을 신속히 통보하고 초기조치를 취하지 않으면 화재가 확대되어 인명과 재산상의 막대한 손실을 초래할 수 있음을 예상할 수 있다. 지하공간의 화재는 일반화재와는 다른 특성을 가지고 있다. 화재시 공기의 공급 부족으로 인하여 불완전 연소가 되어 다량의 연기를 발생시키고 산소결

핍을 초래할 수 있다. 또한 폐쇄공간이기 때문에 발생된 열과 연기가 배출되지 않고 내부에 축적된다. 고열과 축적된 연기로 인하여 내부상황 파악 및 소방대의 화재현장 진입이 곤란하여 화재진화 시간이 지연될 수 있다. 제한된 공간에 다수의 승객이 이용함으로 인하여 승객의 행동 및 피난에 지장을 받는다. 피난방향과 연기의 유동방향이 일치함으로 인하여 피난에 장애요인이 된다. 위와 같은 위험성에도 불구하고 현재 지하철역사는 소방법의 적용을 받지 않고 있다. 지하 공간의 최근의 연구들은 화재시 피해를 최소화하기 위해서는 연기의 제어가 중요한 요소임을 보여주고 있다[2-4]. 적절한 방재대책을 세우기 위해서는 무엇보다도 지하공간 화재의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 수치해석을 통하여 지하철 역사내 연기의 거동 특성을 파악하고 가상 시나리오를 설정하여 배연시스템의 성능을 파악하였다. 이를 통하여 지하철 역사내 방화계획의 수립과 배연시스템의 설계에 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실험 지하철 역사

일본 동경에 위치한 현재 사용중인 지하철 역사에서 연기 거동 실험이 실시되었다[5]. 실험대상 지하철 역사는 섬식 형

† 책임저자 : 정회원, 중앙대학교 기계공학부, 교수  
E-mail : cfdmec@cau.ac.kr  
TEL : (02)820-5280 FAX : (02)813-3669  
\* 정회원, 와세다대학, 객원연구원

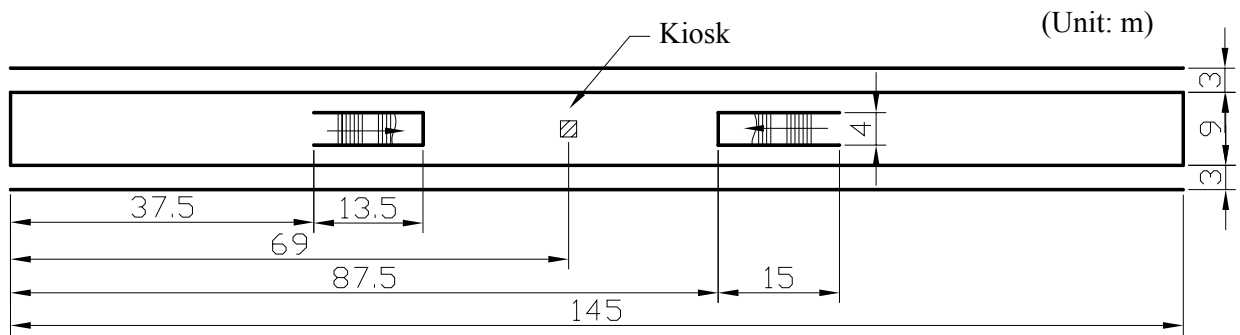


Fig. 1. Schematic of the platform

태이다. 승강장은 높이 2.5 m, 폭 9 m, 길이 145 m이다. 승강장의 개략도 및 단면도를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 승강장은 지하 2층에 위치하고 있으며, 지하 1층의 개찰구 및 콘코스는 지하 2층의 승강장과 계단 및 에스컬레이터로 연결되어 있다. 역사 내에는 기계배연시스템이 설치되어 있으며, 계단과 승강장이 연결되는 위치에 방화셔터가 설치되어 있다.

에탄올을 연료로 사용하였으며 한 변의 길이가 0.5 m인 2개의 메탄올 트레이를 사용하여 실험을 실시하였다. 예비시험을 통해 측정된 결과 하나의 트레이의 발열량은 80 kW로 총 발열량은 160 kW이다. 지하 2층의 경우 승강장과 터널측에 배연구가 설치되어 있으며 총용량은 약 250,000 m<sup>3</sup>/h이다 (승강장측: 96,000 m<sup>3</sup>/h, 터널측: 150,000 m<sup>3</sup>/h). 배연구는 길이방향 5m 간격으로 양쪽에 두 개씩 설치되어 있다. 지하 1층에는 총용량 약 30,000 m<sup>3</sup>/h의 급기구가 설치되어 있다. 실험은 약 12분간 지속되었으며 풍속, 온도, 압력 등을 측정하였다.

### 3. 수치해석

본 연구에서는 수치해석 코드로 미국의 NIST에서 개발된 화재전용 코드인 FDS 4.0을 사용하였다[6]. FDS는 난류해석에 있어서 DNS와 LES를 적용할 수 있으나 DNS 계산의 경우 화재공간 전체를 해석하기에는 지나치게 많은 격자를 요구하므로 본 연구에서는 LES 모델을 적용하였다. LES 모델은 필터링을 통하여 필터의 폭보다 큰 에디들의 유동은 직접 해석하고 작은 에디들은 유동의 형태에 독립적으로 모델링하게 된다. FDS 모델의 필터링에는 가우시안 필터와 모자필터가 적용되고 있으며 본 연구에서는 모자필터를 이용하였다. 연소모델로는 혼합분율 연소모델을 사용하였다.

수치해석은 지하 1층 및 2층의 공간을 대상으로 하여 실시되었다. 배연시스템 및 방화셔터의 작동에 따른 10가지의 가상의 시나리오를 선정하여 수치해석을 실시하였으며 이를

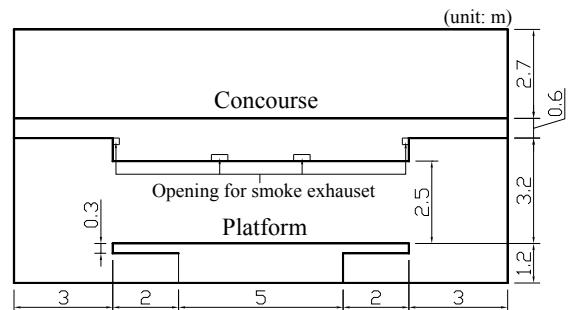


Fig. 2. Cross-section of the subway station

Table 1. Scenarios of fire simulation

Case No.	Ventilation			Fire shutter
	Platform	Tunnel	Concourse	
1	off	off	off	open
2	on	off	off	open
3	off	on	off	open
4	on	on	off	open
5	off	off	off	close
6	on	on	off	close
7	on	on	blow	open
8	on	on	extract	open
9	on	off	off	open
10	off	on	off	open

Table 1에 나타내었다. 화재는 승강장의 좌측 출구에서 87.5 m 떨어진 곳에 위치한 키오스크(2 m×2 m×2 m)에서 폴리스티렌이 연소하는 것으로 가정하였으며 최고 발열량은 10 MW로 가정하였다. 배연장치의 경우, 화재발생 120초 후 작동하는 것으로 하였으며 방화셔터는 화재발생 360초 후 일부 폐쇄되고 480초 후 전부 폐쇄되는 것으로 가정하였다. Case 9와 Case 10의 경우 총 배연용량이 각각 플랫폼과 터널 측에서 작동하는 것으로 가정하였다.

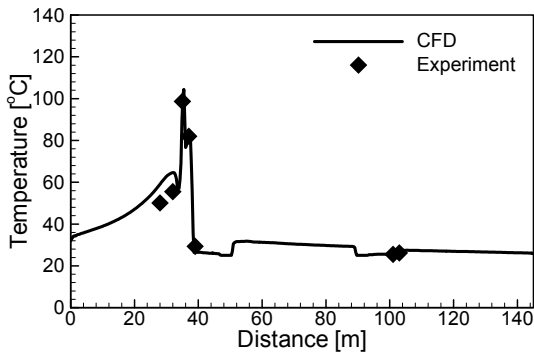


Fig. 3. Temperature comparison under the platform ceiling

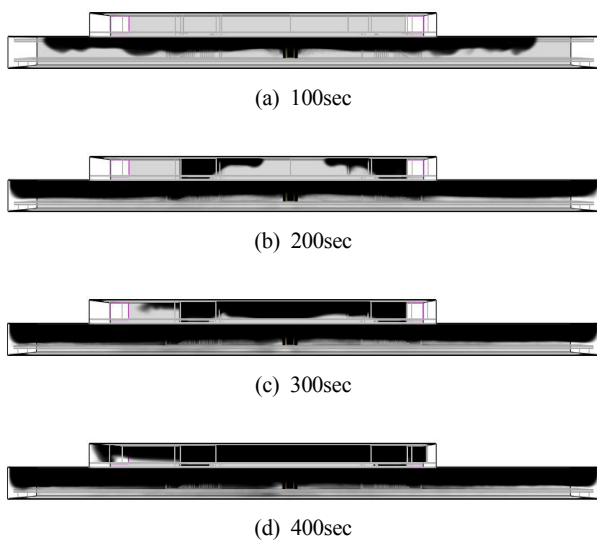


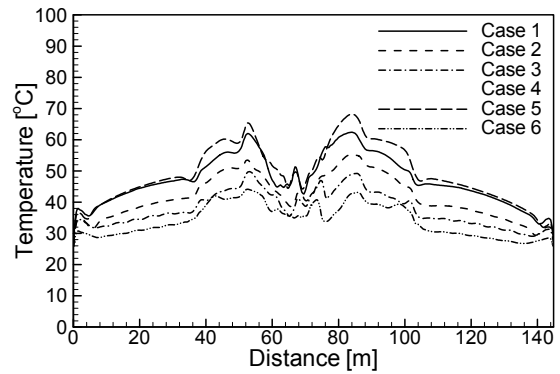
Fig. 4. Distribution of soot density with time

본 연구에서는 격자독립성 테스트를 통하여 최적의 격자를 선정하였으며 수치해석에 사용된 격자수는 약 800,000개이다. 화재발생 이후 600초까지 계산하는데 Pentium-IV 2.13GHz PC를 사용하여 약 47시간이 소요되었다.

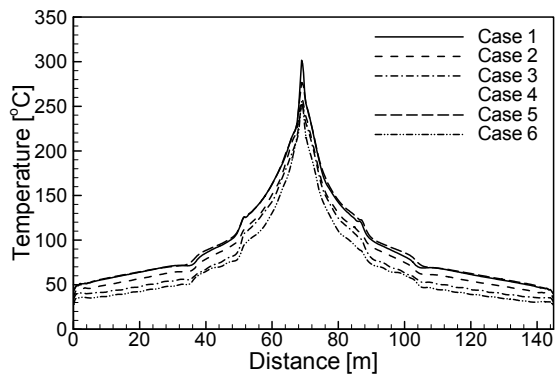
#### 4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 코드의 타당성을 검증하기 위해 화재발생 840초 후 승강장 천장 아래에서의 온도를 실험결과와 비교하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 수치해석 결과가 실험 결과와 최대 10°C 이내의 범위에서 비교적 잘 예측하는 것을 확인할 수 있다.

Case 1에 대하여 시간에 따른 연기의 이동을 Fig. 4에 나타내었다. 화재발생 약 110초 후 승강장 출구에 연기가 도달하였으며 약 130초 후 지하 1층으로 유입되기 시작하였다. 화재



(a) 1.5m



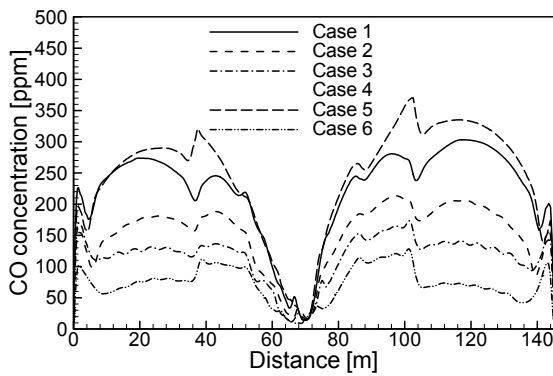
(b) 2.0m

Fig. 5. Temperature distribution in the platform

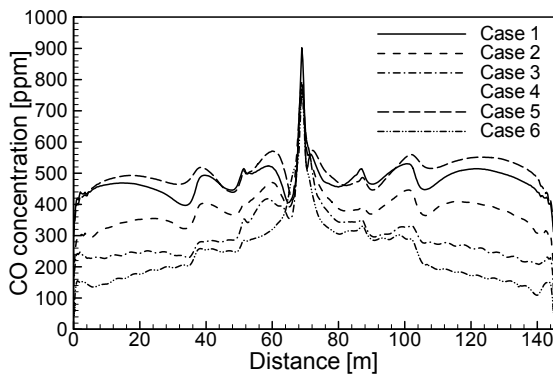
발생 약 400초 후에는 지하 1층 및 2층 전체가 연기로 가득 차는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에 화재발생 600초 후 승강장에서 1.5 m와 2.0 m 높이에서 터널 측벽으로부터 4 m 떨어진 위치에서의 온도분포를 나타내었다. 배연시스템을 작동함으로 인하여 승강장 내부의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 화원의 하부에서는 찬공기의 유입으로 인하여 온도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 승강장 측과 터널 측의 배연설비를 작동한 경우 온도감소 효과가 가장 우수한 것을 확인할 수 있다. 방화셔터의 작동은 승강장 레벨에서 온도의 감소에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다. 그러나 배연설비가 작동하지 않고 방화셔터만 작동한 경우(Case 2) 자연환기에 의한 경우보다 온도가 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다. 화재시 배연설비 등이 화열 등으로 인하여 설비의 일부가 파손되어 정상적으로 작동하지 아닐 경우 발생할 수 있으므로 설계시 이에 대한 고려가 필요할 것이다.

화재발생 600초 후 승강장에서 터널 벽으로부터 4 m 떨어진 위치에서의 CO 농도를 Fig. 6에 나타내었다. 온도결과와



(a) 1.5m



(b) 2.0m

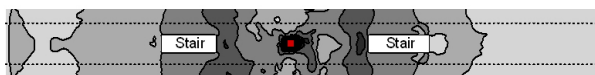
Fig. 6. CO concentration distribution in the platform



(a) Case 4



(b) Case 9



(c) Case 10

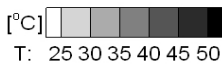
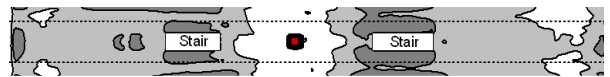
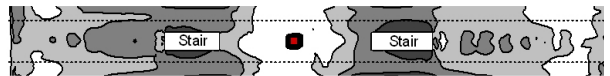


Fig. 7. Temperature contours

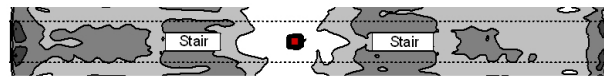
거의 유사한 경향을 보이고 있다. 터널 측에서 배연한 경우가 승강장 측에서 배연한 경우보다 CO 농도 감소효과가 우수한 것을 확인할 수 있는데 이는 배연용량의 차이에서 기인한 것



(a) Case 4



(b) Case 9



(c) Case 10

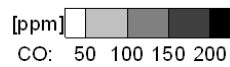


Fig. 8. CO concentration contours

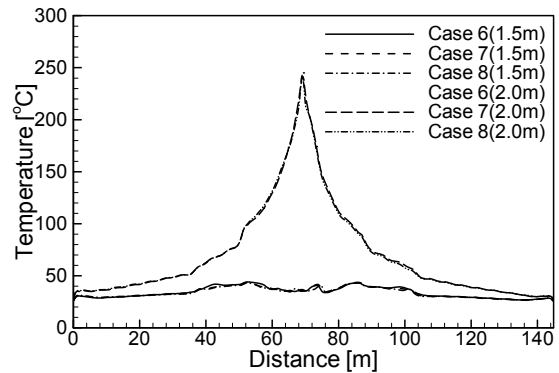


Fig. 9. Temperature distribution in the platform

으로 사료된다. Case 4와 Case 6의 경우 1.5m 높이에서 CO 농도가 약 70 ppm까지 감소하였다.

배연위치에 따른 배연효과를 평가하기 위하여 동일 배연용량(250,000 m<sup>3</sup>/h) 하에서 수치해석을 실시하였다. 승강장의 호흡선 높이(바닥으로부터 1.5 m 높이)에서 화재발생 600초 후 배연위치에 따른 온도와 CO 농도를 비교하였으며 이를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 동일 배연용량일 경우 온도결과는 세경우가 모두 유사한 경향을 보였으나 CO 농도의 경우 터널과 승강장 모두에서 배연을 한 경우가 CO 농도 감소효과가 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

콘코스에서 배연장치의 급기 및 배기방식에 따른 영향을 평가하기 위해 수치해석을 실시하였다. 화재발생 600초 후 바닥으로부터 1.5 m, 2.0 m 높이에서 온도와 CO 농도분포를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 콘코스에서의 배연유무 및 배연방식에 따른 영향이 승강장에서는 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

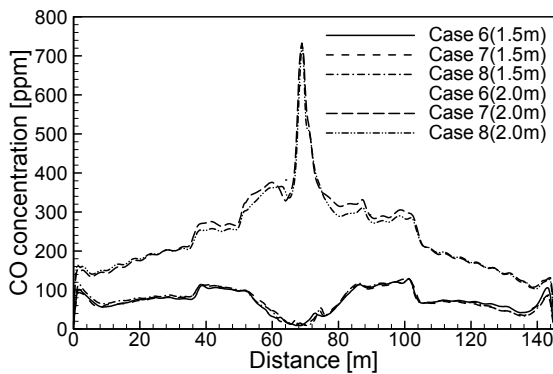


Fig. 10. CO concentration distribution in the platform

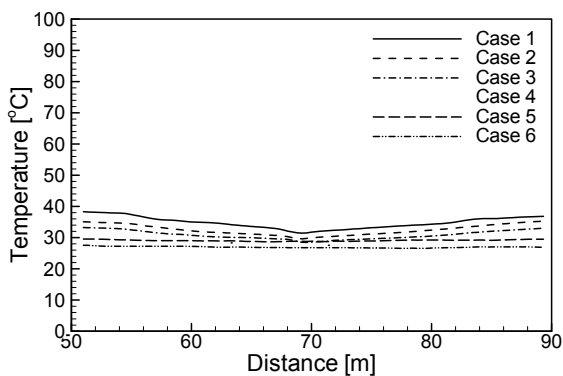


Fig. 11. Temperature distribution in the concourse

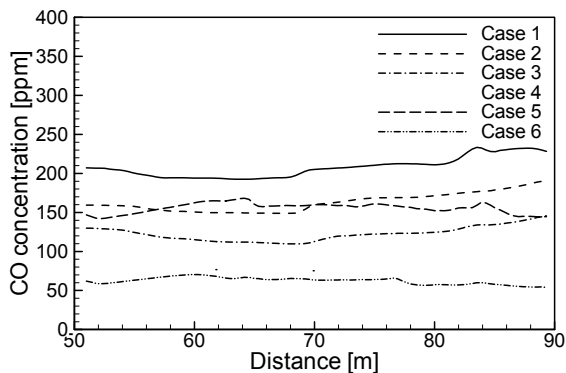


Fig. 12. CO concentration distribution in the concourse

배연시스템 및 방화셔터의 작동에 따른 콘코스에서의 영향을 평가하였으며, 화재발생 600초 후 콘코스 중앙 2.5 m 높이에서의 온도와 CO 농도분포를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. Case 6의 경우가 자연환기를 실시한 경우에 비하여 약 10°C 감소하였다. 자연환기를 실시한 경우 CO 농도가 약 200 ppm에서 기계배연과 방화셔터를 가동함으로써 인하여 약 50 ppm으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 콘코스에서 배기 및 급기를 실시한 경우는 Case 6과 거의 유사한 경향을 보였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 지하철 역사내 화재시 배연시스템 및 방화셔터의 작동에 따른 수치해석을 통하여 온도 및 CO 농도를 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 지하철 역사내 화재시 배연시스템 및 방화셔터 작동을 통하여 온도 감소 및 CO 농도를 감소시킬 수 있다. 그러나 고온의 열 등으로 인하여 배연시스템이 작동되지 못하고 방화셔터만 작동될 경우 오히려 승강장의 연기가 배출되지 못함으로 인하여 피난에 장애가 될 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요할 것이다.
- (2) 콘코스에서의 배기 및 급기는 승강장의 배연설비가 정상적으로 작동할 경우 승강장 및 콘코스에서 온도 및 CO 농도의 감소에 큰 영향을 미치지 않았다.
- (3) 국내의 경우 지하철 역사내 승강장 층에 대한 소방방법이 적용되지 않고 있으나, 방화시스템의 설계시 법규위주의 설계보다는 신방재개념을 도입한 성능위주의 방화설계가 필요할 것이다.

## 후 기

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2006-214-D00021)

## 참 고 문 헌

1. Hong, W.H. (2004). "The progress and controlling situation of Daegu subway fire disaster," 6<sup>th</sup> Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Dague, Korea, pp.28-46.
2. Modic, J. (2003). "Fire simulation in road tunnels," Tunnelling and Underground Space, Vol. 18, No.5, pp.525-530.
3. Gao, P. Z., Liu, S. L. Chow, W. K. and Fong, N. K. (2004). "Large eddy simulations for studying tunnel smoke ventilation," Tunnelling and Underground Space, Vol. 19 No. 6, pp.577-586.
4. Vauquelin, O. and Wu, Y. (2006). "Influence of tunnel width on longitudinal smoke control," Fire Safety Journal, Vol. 41 No. 6, pp.420-426.
5. Moriyama S., Hasemi Y., Okazawa N., Nam DG. and Ding W. (2006). "Smoke Movement Tests in Subway Stations Actually in Service -Smoke Movement Characteristics in Center Platform Stations in the Early Stage of a Fire," Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, Vol. 56 pp.23-

35(in Japanese).

6. McGrattan, K.B. (2006). Fire dynamics simulator (version 4)  
-Technical reference guide, NIST.

(2007년 4월 18일 논문접수, 2007년 6월 18일 심사완료)