

## 객차 화재로 인한 터널 내부 정차시 열차풍 지속시간에 따른 화재 및 피난 특성 연구

장희철 1, 박리진 2, 김태국 3\*, 김동현 4\*\*

중앙대학교 대학원 1,2 \*중앙대학교 기계공학부 3, \*\*한국철도기술연구원 4

### Study on Fire and Evacuation Characteristics from a Passenger Train Fire for Different Duration of Train Induced Wind in an Underground Subway Tunnel

Hee-Chul Chang 1, Lee-Jin Park 2, Tae-Kuk Kim 3\*,  
Dong-Hyun Kim 4\*\*

Graduate School, Chung-Ang University 1,2, Mechanical Engineering Department,  
\*Chung-Ang University 3, \*\*Track & Civil Engineering Research Department 4

#### 1. 서론

국내에서는 지난 2003년 대구지하철 중앙로역 방화사건으로 사회적 파장을 일으키며, 지하철 화재사고에 대한 위험성이 부각되기 시작했다. 이 사건으로 지하철이 국내 대도시를 중심으로 전 지역에 넓게 연결되어 있으며, 지속적으로 건설되고 있음을 감안할 때 밀폐공간과 유사한 구조인 지하철 터널에서의 화재가 대형 참사로 연결될 수 있음을 사고·사례를 통하여 예측할 수 있다. 과거에서 현재에 이르기 까지 국가 간의 종교·이념·사상적인 문제 등이 발생되고, 이와 같은 갈등은 테러와 같은 극단적인 방법으로 표출되기도 한다. 또한 개인의 정신장애 및 개인적·사회적 불만 등이 방화를 일으키는 사례를 접할 수도 있다. 하지만 지하철에서의 테러나 방화는 공항과 같이 수많은 경찰인력 또는 장비를 이용해 철저히 예방할 수 없는 것이 현실이므로, 지하철역사 및 객차 내부에서의 테러나 방화로 인한 화재발생의 피해를 최소화할 수 있는 대책이 절실히 요구되고 있다. 도로터널과 철도터널 화재에 대한 실험적 수치적 연구에 비하여 지하철 터널에 대한 연구가 상대적으로 미흡하였으나, 최근 들어 국내에서 수치적 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 열차에서 화재가 발생하여 터널 내에 정차했을 경우 열차풍 지속시간에 따른 열 및 연기거동 특성 및 피난특성 예측을 목적으로 한다.

#### 2. 본론

##### 2.1 해석모델 개요

본 연구는 서울지하철의 대표적인 역사와 터널 및 열차 등의 형상을 유사하게 모델링하여 해석대상으로 고려하였다. 해석대상은 그림1에서와 같이 두개의 역사, 두 개의 역사 사이의 터널 및 양쪽 터널이다. 역사의 크기는 각각 20m[W]\*200m[L]\*6m[H], 두 역

사 사이의 터널크기는 9m[W]\*810m[L]\*6m[H], 양쪽 터널은 동일한 너비와 높이로 각각 270m[L]을 고려하였다. 따라서 해석대상인 역사 및 터널의 총연장은 1,750m[L]이고, 화재가 발생한 열차의 크기는 4.5m[W]\*19.5m[L]\*3.4m[H]\*10량(서울지하철 4호선 열차 고려)이다. 열차의 출입구는 양측 모두 개방되어 있고, 열차내부 재료특성은 현재 교체되고 있는 신형 열차를 대상으로 고려하였다. 터널내부의 환기구는 총 5곳으로서 두 역사 사이에 3곳, 양측 터널에 각각 1개의 환기구가 위치하는 것으로 설정하였다. 환기구의 풍량은 화재발생시 최악의 상황을 고려하기 위하여 서울지하철 7호선의 급·배기 풍량인 1,000m<sup>3</sup>/min을 적용하였으며, 환기구는 측부형으로 10m\*1.8m의 크기로 고려하였다. 그림1, 2는 해석모델의 개략도와 터널의 평상시 및 비상시 환기모드이다.

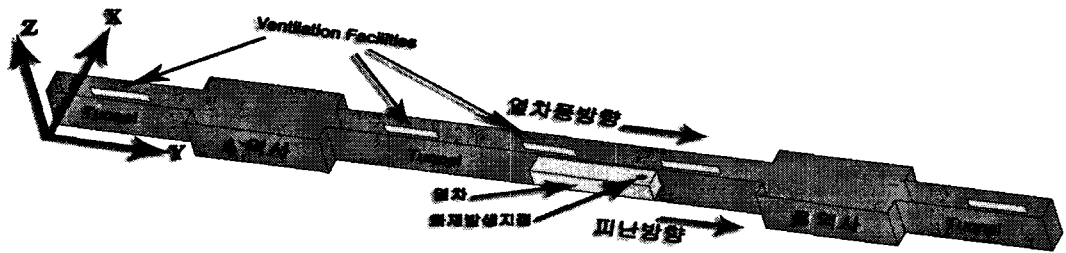


그림 1 해석모델 개략도

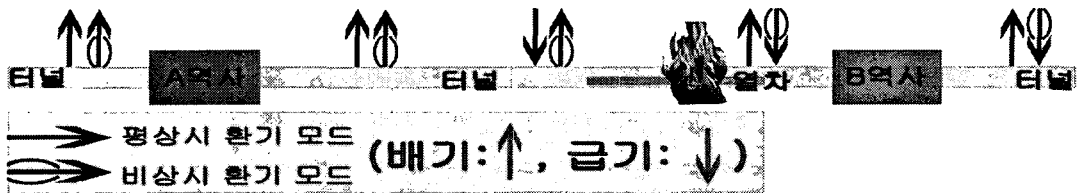


그림 2 터널의 평상시 및 비상시 환기모드

## 2.2 가상 화재를 고려한 화재시뮬레이션

본 연구에서 사용된 소프트웨어는 미국 표준 연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulator) Version 4.06<sup>2)</sup>이며, 프로그램의 database에 열차내부 재료성분을 고려하여 수치해석을 수행하였으며, 고려된 재료의 성분은 벽·천장(Aluminum), 의자(Stainless Steel), 바닥(Synthetic Rubber)로 모델링 하였다. 그 외 터널 및 역사의 구조물은 콘크리트로 고려하였다. 격자구성은 균일하게 약 103만개로 생성하였으며, 시뮬레이션에 적용한 화재의 크기는 필라델피아 지하철 화재에서 예측된 열량값을 기준으로 산정한 값에 안전율을 감안하여, 발화 5분경과 후 최대 열 방출량이 20MW가 되는 것으로 적용하였다.<sup>3)</sup> 시간에 따라 발생하는 열방출량은 Power Law Relation<sup>4)</sup>공식을 이용하였고, 그림3과 같다.

열차 주행시 열차풍은 터널의 구조적인 형상과 발생하는 공기압의 분포, 열차와 열차풍과의 상대속도에 의한 저항치 계산 등에 의해 복잡한 과정으로 결정되기 때문에 수작업으로는 정확한 계산이 곤란하며, 주행 중 열차에서 화재가 발생할 경우 화재진압 비상시 환기방식에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 연구에서는 서울지하철 1~4호선을 대상으로 한 역사내로 열차가 진입할 경우 풍속측정 실험결과에서 최소유속과 최대유속의 평균값을 산출한 값에 화재성장속도를 고려하여 시뮬레이션의 경계조건으로 적용하였다<sup>5)</sup>. 열차풍 지속 시간 및 최대 유속을 표1과 그림4에 각각 나타내었다.

표 1 수치해석 조건

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
열차풍 지속시간	0 sec	120 sec	240 sec	360 sec
열차풍 최대유속	3.4m/s			

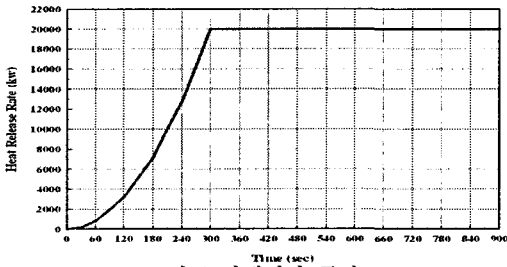


그림 3 화재성장 곡선

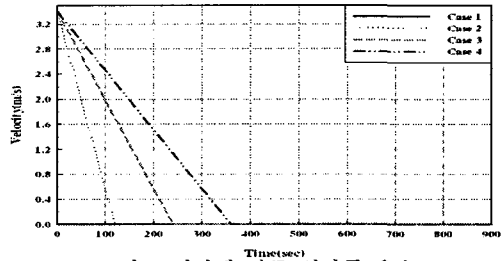


그림 4 시간에 따른 열차풍 유속

### 2.3 피난 시뮬레이션

본 연구에서 사용된 SIMULEX는 건물 및 터널, 지하철 등의 화재발생시 인간의 심리 인자 및 행동특성을 감안한 2차원 피난대피시뮬레이션 전용코드이다. CAD와 인터페이스가 가능함으로 화재시뮬레이션에 적용한 역사, 터널 및 열차 크기를 적용하여 승객들이 피난경로를 따라서 승강장에 도달하는 시간을 예측하여 보았다. 피난인원은 열차의 수용인원인 160명\*10량으로 계산하여 총 1,600명이 열차에서 배치시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 발화 후 바로 화재를 인지하고 피난이 이루어지도록 설정하였으며, 피난 인원구성은 성인 남자 35%, 성인 여자 40%, 어린이 15% 및 노인 10%로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

열차풍 지속시간에 따른 열 및 연기분포 특성 비교를 위하여 터널 바닥을 기준으로 호흡높이인 1.6m 및 3.4m을 대상으로 하였다. 해석 대상의 터널길이가 매우 길기 때문에 그림5와 같이 열차와 열차풍 방향의 터널의 일부를 확대하여 그림에 나타냈으며, 그래프는 화재가 발생한 터널 구간에서 열차가 정차한 반대편 선로 중앙에서 호흡높이를 대상으로 온도 및 연기농도 분포를 나타내었다.



그림 5 해석 구간 개략도

### 3.1 온도 분포 비교

터널바닥기준 호흡높이(z=1.6m)에서 열차풍 지속시간이 0초, 120초인 경우에 발화 300초 이전까지 화재발생지점을 기준으로 전후 40m(L) 부근까지 열이 확산됨을 보였다. 모든 해석조건에서 발화 600초 이후 화재발생지점에서 열차풍 방향으로 30m(L)가량 떨어진 지점부터 B역사 좌측 끝단까지 온도분포가 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였는데, 이는 열차풍이 감소하여 없어지는 반면 비상시 환기모드는 지속적으로 작동하기 때문으로 사려 된다. 열차풍 지속시간이 가장 긴 경우(360초) 발화 200초 이후 열

차풍 방향인 B역사로의 열 확산이 가장 빠르며, 열차풍의 지속시간에 비례하여 열이 확산되었다. 열차풍이 사라지면 비상시 환기모드에 의하여 열차풍 반대방향으로 기류가 형성되어 열이 확산되었던 구간이 점차 감소됨을 확인할 수 있다. 발화 900초 후 열차풍 지속시간이 240초, 360초인 경우 열차풍 방향의 B역사 시점부까지 열이 확산되며, 열차풍이 사라지는 발화 480초 이후에는 모든 해석조건에서 화재지점 구간을 제외하고는 유사한 온도분포를 나타냈다. 또한, 모든 해석조건에서 발화 500초 이후에 터널 내 정차된 열차 10량의 절반인 5량까지 열이 확산되었으며, 열차풍 지속시간을 고려하지 않은 경우에 차량 내부로 열이 확산되는 속도가 가장 빠르게 나타났다. 그림 6 및 그림 8a는 터널의 바닥기준 1.6m에서 발화 360초, 420초 후 온도분포이다.

터널바닥기준 높이(z=3.4m)에서 열차풍 지속시간 360초인 경우 발화 300초 이후 화재 발생지점에서 80℃ 이상의 온도분포를 보였으며, 발화 900초 후 모든 해석조건에서 100℃ 이상의 높은 온도분포를 보였다. 열차풍을 고려하지 않은 경우 발화 600초 이후에 화재가 발생한 열차 내부에서 가장 높은 온도분포를 보였고, 열차풍 반대 방향으로 열이 확산되는 면적 또한 가장 넓었다. 모든 해석조건에서 발화 700초 이후 터널 내 위치한 열차 내부 전구간에 열이 확산됨을 확인할 수 있었다. 그림7 및 그림 8b는 터널의 바닥 기준 3.4m(열차바닥기준 1.6m)에서 발화 480초, 420초 후 온도분포이다.

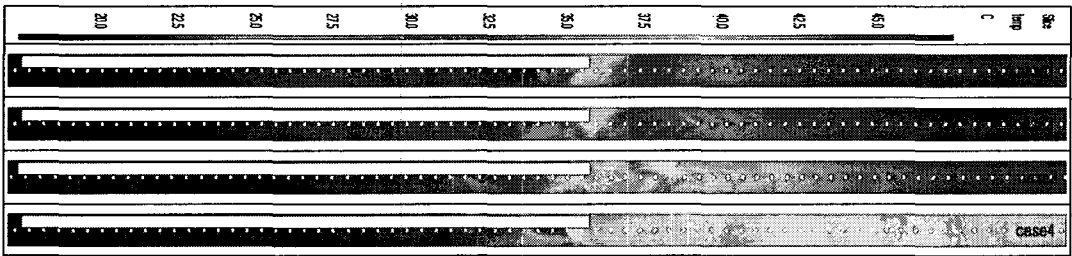


그림 6 터널의 바닥기준 1.6m 호흡높이에서의 온도 분포(t=360sec)

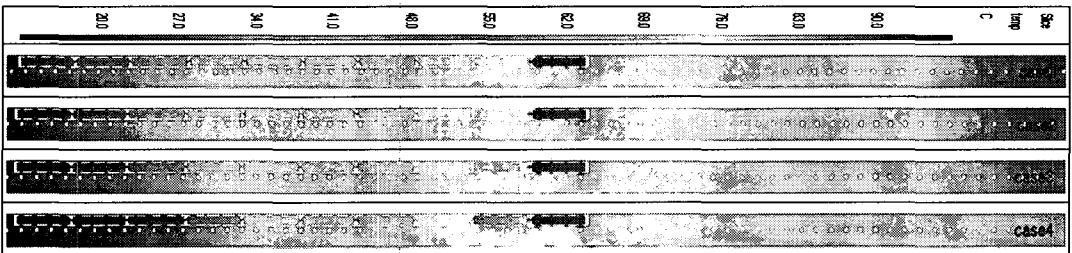
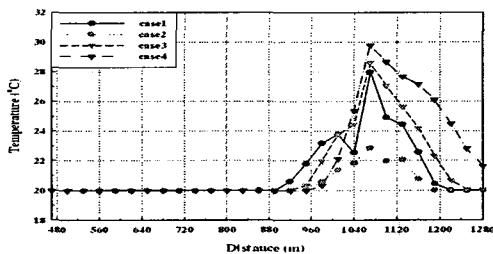
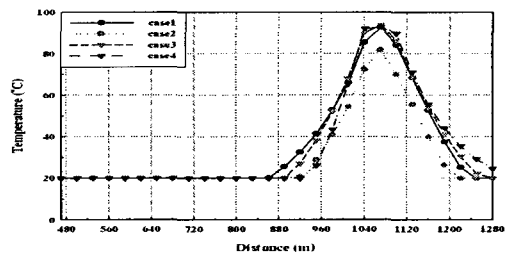


그림 7 터널의 바닥기준 3.4m(열차의 바닥기준 1.6m 해당) 호흡높이에서의 온도 분포(t=480sec)



a) 터널의 바닥 기준 1.6m 높이



b) 열차의 바닥 기준 1.6m 높이

그림 8 발화 420초 후 터널길이방향의 온도분포(터널의 바닥기준 z=1.6m, z=3.4m)

### 3.2 연기농도 분포 비교

열차풍의 영향이 급기로 인한 영향보다 더 크기 때문에 연기농도의 분포는 열차풍의 방향과 동일한 방향으로 확산되었고, 화재가 발생한 터널 내 열차의 우측 끝부분에 와류가 형성되는 것을 확인하였다. 터널바닥기준 호흡높이( $z=1.6m$ )에서 열방출량이 최대가 되는 발화 300초 후까지 연기농도의 분포가 유사하며, 열차풍 지속시간이 가장 긴 경우의 연기농도 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 열차풍 지속시간이 0초, 120초인 경우 길이방향  $y=0m(L)\sim 980m(L)$ 지점까지 연기분포에 큰 영향이 없으나, 열차풍 지속시간이 120초 초과하여 길어질수록 연기확산이 빠르게 나타났다. 터널바닥기준 호흡높이를 기준으로 터널의 길이방향 연기분포는, 열차풍이 없어지는 시간에서부터 발화 500초 후까지 급기가 되는  $y=1080m(L)$ 지점에서 터널의 길이방향으로 대칭형태의 연기분포를 보였다. 발화 600초경과 후 급기가 되는  $y=1080m(L)$ 지점(화재지점구간의 피난방향 환기구)에서 피난경로 반대방향인 A역사 방향으로 연기농도분포가 증가함. 시간이 경과함에 따라  $y=1080m(L)$ 지점을 전후로 연기분포의 차이는 더 커졌으며, 700초 후에는 열차풍 방향의 터널부에서 측면급기가 연기를 교란 시키는 역할을 하였다. 그림 9 및 11a)는 터널의 바닥기준 1.6m 호흡높이에서 발화 360초, 420초 후 연기농도 분포이다.

측면에서의 급기는  $y=1080m(L)$ 지점에서 터널바닥 높이(3.4m)이하의 증가된 연기분포를 감소시키는 효과가 있었으나, 터널 천정부근에서는 기류에 의한 연기의 가중으로 인해  $y=1080m(L)$  지점에서 가장 높은 연기농도 분포를 보였다. 그림10, 11b)는 터널바닥 기준 3.4m(열차바닥기준 1.6m) 호흡높이에 발화 480초, 420초 후 연기농도분포이다.

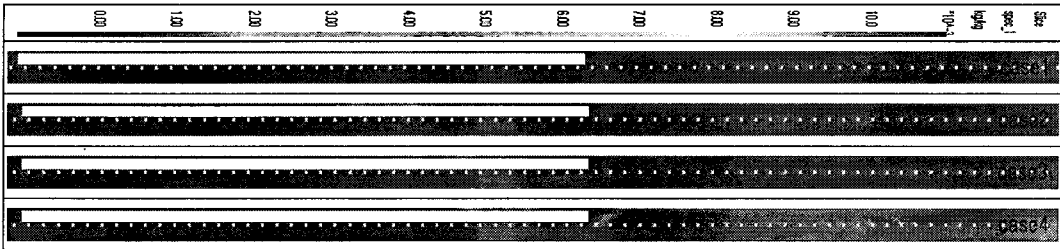


그림 9 터널의 바닥기준 1.6m 호흡높이에서의 연기농도 분포( $t=360sec$ )

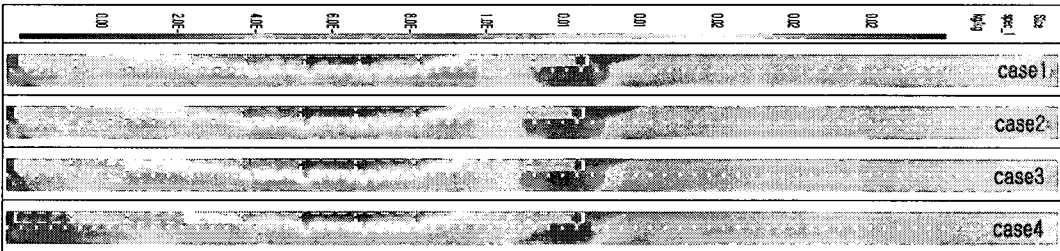
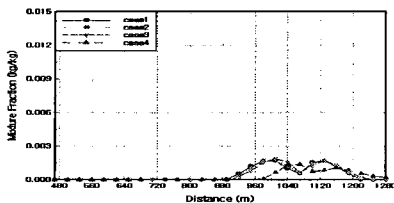
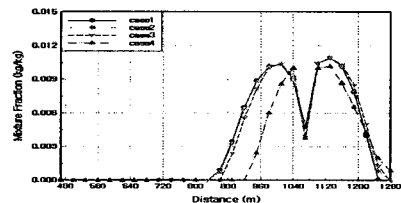


그림 10 터널의 바닥기준 3.4m(열차의 바닥기준 1.6m 해당) 호흡높이에서의 연기농도 분포( $t=480sec$ )



a) 터널의 바닥 기준 1.6m 높이



b) 열차의 바닥 기준 1.6m 높이

그림 11 발화 420초 후 터널길이방향의 연기농도 분포(터널의 바닥기준  $z=1.6m$ ,  $z=3.4m$ )

### 3.3 피난 시뮬레이션 결과

최종 피난장소로 설정한 승강장(B역사)과 가장 멀리 떨어진 승객의 거리는 약 405m이며, 열차 허용인원 1,600명이 열차로부터 피난하여 승강장에 도달하는 시간은 15분 8.4초로 나타났다. 피난이 시작되면 객차 내부에 인원이 출입문으로 피난이 이루어짐으로 출입문에서 극심한 병목현상을 보이며, 피난 거리가 길기 때문에 걷는 속도가 느린 노약자가 시간 경과에 따라 뒤로 처지는 것을 확인할 수 있었다. 그림12는 시간대별 승강장에 도달하는 인원수를 보여주고 있다.

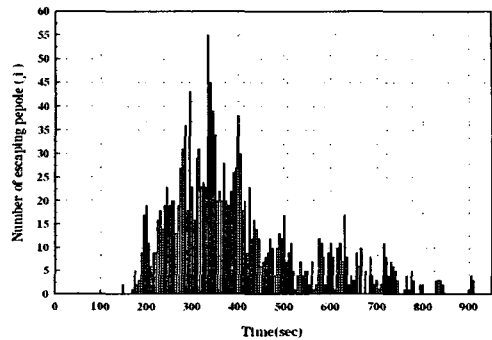


그림 12 시간대별 승강장으로의 피난인원

### 4. 결론

본 연구는 열차에서 화재가 발생하여 터널 내에 정차했을 경우 열차풍 지속시간에 따른 열 및 연기거동 특성 예측 및 승객들이 열차에서 피난동선을 따라 역사에 도달하는 소요시간 예측하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

열차풍의 지속시간은 기류를 형성하여 열 및 연기를 빠르게 확산시키는 것으로 나타났다. 열차풍이 피난경로의 방향으로 빠른 유속으로 기류가 지속될 경우 피난에 어려움을 줄 수 있음을 확인하였다. 열차풍을 고려하지 않은 경우, 열차 내부의 열 및 연기 전파 속도가 가장 빠르게 나타났다. 현재 운영 중인 비상시 환기모드(피난경로-급기, 반대경로-배기)에 의하여 열차풍이 없어지는 시간 이후에서는 열 및 연기확산이 피난 방향으로 더 이상 진행되지 않으며, 오히려 확산되었던 구간의 온도 및 연기농도가 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 비상시 환기모드가 제연효과에 적절함을 보여준다고 사려 된다. 열차풍 지속시간에 상관없이 발화 700초 이후 열차 내부의 전 객차로 열이 확산되는 것으로 나타났다. 피난시뮬레이션 결과 총인원인 1,600명이 승강장에 도달하는 시간은 15분 8.4초로 나타났다.

### 감사의 글

“지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업”의 일환으로 시행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 장희철, 윤경범, 박리진, 김태국, 박원희, 김동현, “지하철 터널 내 운행 중 열차에서 화재발생시 제연풍랑에 따른 열 및 연기 확산 예측”, 한국방재학회 학술대회 발표논문, pp.250-253(2007)
2. K. B. McGrattan, “Fire Dynamics Simulator(Version.4) Technical Reference Guide”
3. 이동호, 유지오, “지하철 화재시 본선터널 환기시스템에 따른 열 및 연기배출특성”, 한국화재·소방학회 논문집, 제17권 제2호, pp.62-69 (2003)
4. National Fire Codes, “Guide for Smoke Movement System in Malls, Atria and lastge Area”, NFPA 92B, 2005 Edition.
5. 차철현, “地下鐵의 列車風이 停車場內 空氣環境에 미치는 影響에 관한 研究”, 한양대학교 산업대학원, 석사학위논문, pp.43-45, 47-48 (1995)