

# 선회유동과 난류혼합

## Turbulent Mixing in Swirling Flows



신 현 동 \*  
Hyun Dong Shin

### 1. 머리말

열 유체 관련기기 내의 유동은 상당수 선회운동을 수반하고 있다. 선회운동이란 주(主) 방향 운동량에 대하여 접선방향 운동량이 존재할 경우의 유체유동을 의미하는 것으로서, 두가지 이상의 유체 또는 반응체의 반응속도를 제어할 목적으로 각종 반응기에 대부분 이용되고 있으며, 또한 밀도의 차이가 있는 물질로 구성된 혼합물의 분리 목적으로 사이클론 분리기, Ranque-Hilsch 튜우브 같은 곳에 주로 쓰이고 있다. 반응속도 제어용으로서의 선회유동은 자동차 공업에 널리 쓰이고 있음은 주지의 사실로, 압축점화식 엔진에는 오래전부터 널리 쓰이고 있는 실정이다.

한편 최근 연료분사 제어기술의 발달에 힘입어 연료분사 방식을 불꽃 점화식엔진에도 채택함으로써 연소실내로의 선회유동이 도입되게 되었다. 선회유동의 이용 목적은 상기한 바와 같이 연소속도(반응속도)의 제어(주로 연소속도 증가)에 있으며, 다른 한편의 이용목적은 혼합물의 분리에 있다. 얼핏 보기에는 연소속도의 증가와 혼합물의 분리는 서로 상반되는 효과로 간주될 수 있다. 즉 연소속도 증가는 선회유동에 의하여, 밀도가 다른 두 종류 유체의 혼합속도 증가에 기인한다고 보

면, 선회유동에 의한 혼합물의 분리는 혼합속도와 서로 상반된 효과를 나타낸다고 볼 수 있다.

이런 관점에서 보면, 선회유동에 의한 혼합특성은 혼합속도를 증가시킬 뿐 아니라 감소시킬 수도 있음을 알 수 있다. 따라서, 선회유동이 혼합특성에 끼치는 영향은 이동현상론적인 입장에서 규명되어야 하며, 이를 위하여 시간평균 유동장의 측정과 선회유동내의 난류성분 측정이 필요하게 된다.

본문에서 선회의 정도를 나타내는 선회도각 크고 작은 대표적인 두가지 경우에 대하여 시간평균 구조와 난류혼합 특성을 나타내는 시간변동치의 상관관계를 실험적으로 구한 예를 제시함으로써 선회운동에 의한 난류혼합 특성을 설명 하고자 한다.

### 2. 선회운동의 응용과 그 목적

연소기 내에 일어나는 연소형태에 따라 연소방식을 다양하게 정의하게 된다. 외연식, 내연식으로 구분이 되는가 하면 반응체의 상(相)에 따라 균일, 비균일 연소등으로도 구분되기도 하고, 반응체의 혼합상태에 따른 예 혼합연소, 확산연소 등으로 분류되기도 한다. 엔진 내의 연소 연구에서는 연소자재가 비정

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

상 상태이므로 정상상태의 연소반응 유체유동의 결과와 대비, 설명하여야 할 경우가 많으며, 정상상태에서의 각종 현상을 비정상 유동에 도입해야 할 경우도 많다. 따라서 이 경우에 연속연소 및 간헐(비연속)연소로 또한 분류하기도 한다.

그림 1은 간헐식 연소기에 있어서 선회유동의 효과를 개념적으로 나타낸 것으로써, 압축점화엔진 연소실내의 분무특성이 선회유동에 의하여 연소효율 향상이 기대된다. 이 경우 선회유동은 분무의 확장각 또는 증발과정에 영향을 주어, 결국 분무의 도달거리를 변화시키는 것으로 사료된다. 분무의 도달거리가 짧아지므로써 벽면 급냉각에 의한 미연소분을 줄일 수 있으며, 연료소비율에 중극적으로 바람직한 효과를 기대할 수 있는 것이다.

그림 2는 역시 간헐식 연소기중 불꽃점화식에 선회유동을 도입한 경우에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 앞에서 언급하였듯이 압축점화식에 선회유동을 도입하는 목적은 주로 물리적 유동(분무의 도달거리)의 변화(단축)에 있다. 이 경우에도 물리적인 유동의 변화도 기대 되지만 연소속도의 증가도 기대된다. 그러나 선회유동에 의한 난류특성이 바뀔 것으로 판단하기 어렵지만, 난류에 대한 연소속도의 증가로부터 난류의 공간적인 분포를 제어할 수 있을 것으로도 기대된다.

불꽃점화식 연소기에 선회유동이 적용되는 이유는 아직 충분한 연구가 이루어지고 있지 않다고 볼 수 있으며 연료분사 불꽃점화식인 경우에는 미연혼합기의 혼합도 증진에도 그 영향이 있으리라 사료된다. 한편 그림 3은 연속식 연소엔진에 공기노즐과 연료노즐로부터의 유체 각각에 선회유동을 부여하여, 배기가스 대책을 달성하려는 연소기의 개략도를 예시한 것이다. 일반적으로 연속식 연소기로부터 단위체적, 시간당 많은 발열량을 얻어야 하므로, 연료와 산화제의 혼합속도를 증가시킬 필요가 있다. 연료와 산화제의 난류혼합속도 증가를 꾀하기 위하여, 우선 생각되는 방법으로는 난류정도(이 경우 난류강도)를 증

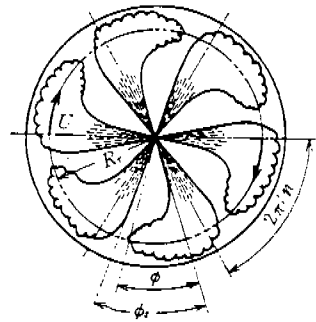


그림 1. 압축점화식엔진내의 선회유동

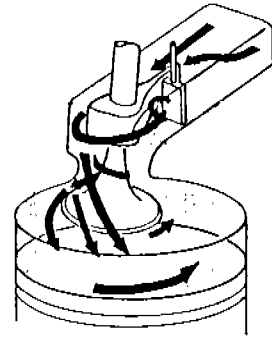


그림 2. 불꽃점화식엔진내의 선회유동

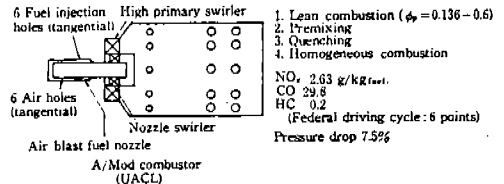
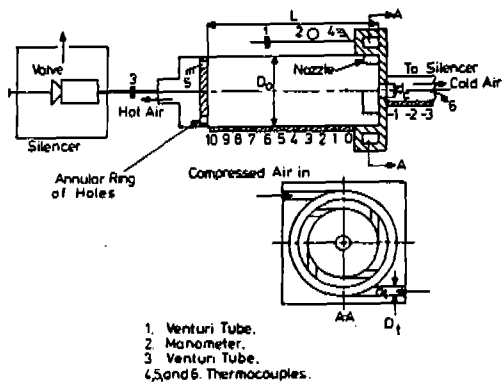


그림 3. 연속식 연소엔진

가시키는 방법과 시간평균 유동장을 변화시킴으로써 난류의 공간분포를 바꾸는 방법을 생각할 수 있다. 같은 Reynolds No.에 대한 유동의 난류강도를 임의로 제어하기란 어려운 일이며, 따라서 후자의 방법을 주로 도입하게 된다.

이때 시간평균 유동장의 변화에 선회유동이 도입되게 된다.

그림 4에는 압축공기로부터 비교적 낮은 온도의 유체와 높은 온도의 유체로 분리할 수



$$\rho c_p \left\{ u \frac{\partial T_0}{\partial x} + v \frac{\partial T_0}{\partial r} \right\} = \frac{-v}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho w' v') - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r c_p \rho u' T')$$

(A) (B)

$$(A) \quad \overline{\rho w' v'} \approx -\mu \left\{ \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right\}$$

$$(B) \quad \rho c_p \overline{v' T'} \approx -k_t \left\{ \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\partial T_{ad}}{\partial r} \right\}$$

그림 4. Ranque-Hilsch tube

있는 소위 Ranque Hilsch 튜브의 개략도를 나타낸다. "A"라는 단면으로부터 시간평균적으로 온도분포가 없는 공기를 접선방향으로 주입시켜서 L만큼의 거리를 진행하면 원통벽면 근처에서는 비교적 더운 공기가 얻어지며, 중심축 부근으로부터는 서늘한 공기를 얻어낼 수 있다.

이는 반경방향 속도변동성분  $v'$ 와 온도변동성분  $T'$ 의 상관관계가 상대적(Reynolds stress 항)으로 비교적 큰 값을 갖게되므로, 반경방향으로의 온도분포가 형성되게 된다. 즉 이 경우 에너지 분리는 난류 열이동으로부터 기인되며, 선회유동내에서의 난류를 형성하고 있는 에디(eddy)의 단열압축과 팽창에 의한 것으로 설명할 수 있다. 이 경우는 그림 1.2 그리고 3에서 보인 혼합촉진 효과와 상반되는 효과를 얻어낼 수 있음을 시사한 예이다.

### 3. 약선회인 경우 난류이동 현상

일반적으로 선회의 정도를 나타내는 선회도가 0.6 미만일 경우는 약선회라 일컫고 그 이

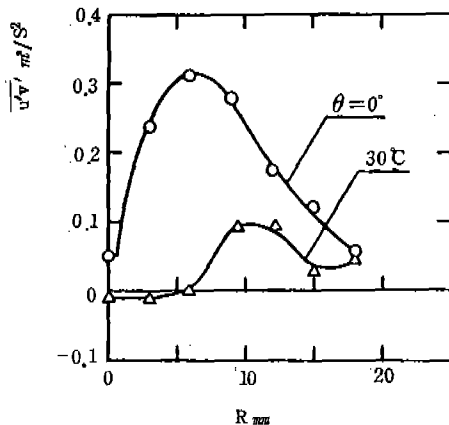


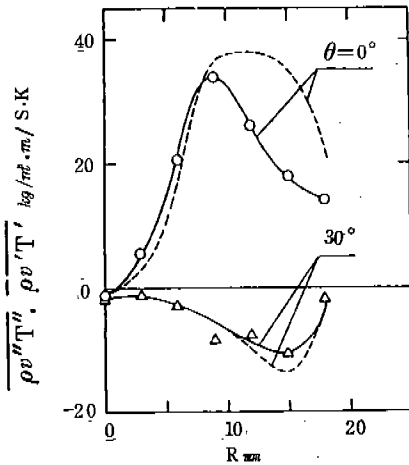
그림 5. 선회류 유무에 따른 축 및 반경방향 속도변동 상관치 분포

상의 경우를 강선회라 칭한다. 선회도의 증가 즉 주방향 운동량에 대한 접선방향 운동량의 비율을 점점 증가 시켜서, 한계선회도를 넘기면, 유동장내에 역류영역이 형성되는 소위 Vortex break down이 생기게 된다.

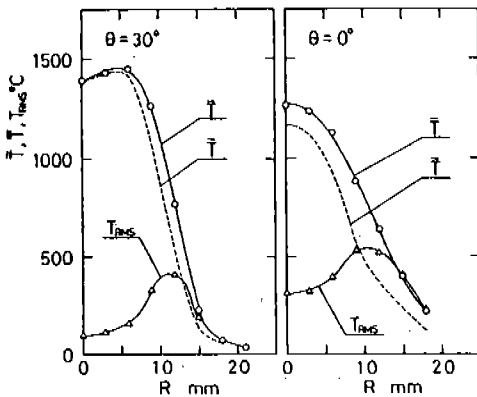
이 장에서는 선회유동의 혼합특성을 분명히 하기 위하여, 우선 선회도가 낮은 즉 약선회일 경우 선회유동에 의한 난류이동 특성을 실험적으로 규명한 결과를 간단히 소개하고자 한다. 그림 5는 선회도 0.26정도일 경우 변동속도 성분들의 상관관계를 구한예를 나타낸것으로써 Reynolds stress의 측정량의 분포이다.

유동장은 수소와 프로판의 혼합기를 내경 7mm의 노즐로부터 분출시키고, 연료노즐과 같은 축을 갖는 주위 원관에 공기를 분출시켜서 형성된 것으로써, 그림 5는 화염이 형성되어 있을 경우의 Reynolds stress의 실측결과이다. 한편 주위 공기류는 선회를 주지 않았을 경우( $\theta=0^\circ$ )와 선회도 0.26에 해당하는 선회각( $\theta=30^\circ$ )을 유동장내에 부착한 경우를 각각 나타내고 있다.

단면 분포전체를 통하여 선회유동이 있으면, 선회가 없을 경우보다 같은 기하학적 단면에서 난류운동량 이동 특성을 나타내는 Reynolds stress의 값이 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고 난류에 의한 에너지 이동 특성을



(a)  $\overline{\rho v'' T''}$  (—)와  $\overline{\rho v' T'}$  (---)의 반경방향 분포



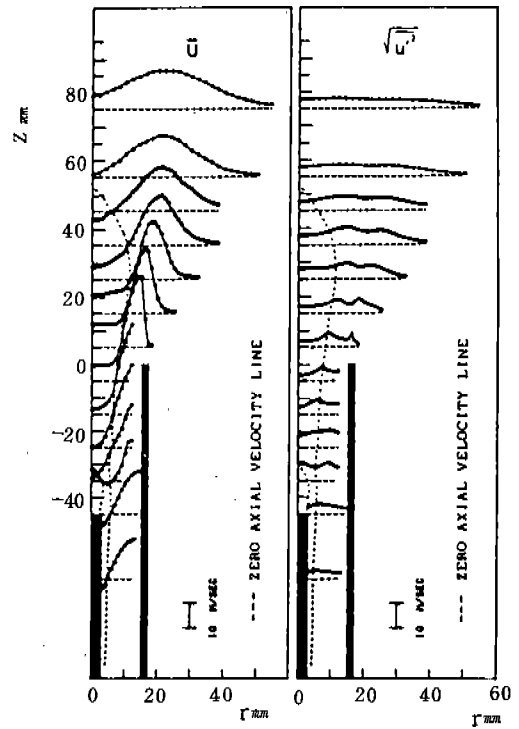
Profiles of time-averaged temperature and temperature fluctuation intensity in the flames with and without swirl.

(b) 시간평균온도분포 및 온도변동강도 분포

그림 6. 선회류 유무에 따른 온도 및 난류 에너지 단면분포

규명하기 위하여 반경방향 속도변동성분( $v'$  또는  $v''$ )과 온도변동성분( $T'$  또는  $T''$ ) 간의 상관관계를 선회가 있을 경우와 없을 경우 각각에 대하여 단면분포를 대비시킨 것이 그림 6(a)이며 그림 6(b)에는 시간평균 온도분포와 온도변동 r. m. s. 의 분포를 병기 하였다.

이 그림에서 "은 밀도가중치(Farve's 평균)를 의미한다. 단면을 통하여, 선회가 없



(a) (b)

(a) Axial Component of Mean Velocity  
(b) Axial Component of RMS Velocity Fluctuation

그림 7. 속도측정결과

을 경우  $\overline{\rho v' T'}$ 의 분포는 양(陽)의 값을 갖고 있으며, 중심으로부터의 거리  $R = 9 \text{ mm}$  근처에서 제일 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)의 시간평균 온도( $\bar{T}$ ) 분포로부터  $R = 9 \sim 10 \text{ mm}$  근처에서 구배가 가장 급격한 것으로 미루어보아 온도구배에 의한 에너지 이동 특성을 잘 설명하고 있다고 판단된다. 한편, 선회각  $30^\circ$ 의 날개를 붙인 경우에는 단면전체를 통하여 음(陰)의 값을 갖고 있으며, 최저점의 위치는  $R = 14 \text{ mm}$  근처이다. 이는 그림 6(b)의 시간평균 온도구배와 난류에너지 이동 특성을 결부지을 수 없음을 알 수 있다.

따라서 선회유동이 없을 경우, 시간평균 온도구배와 난류에너지 이동향과의 연관으로써

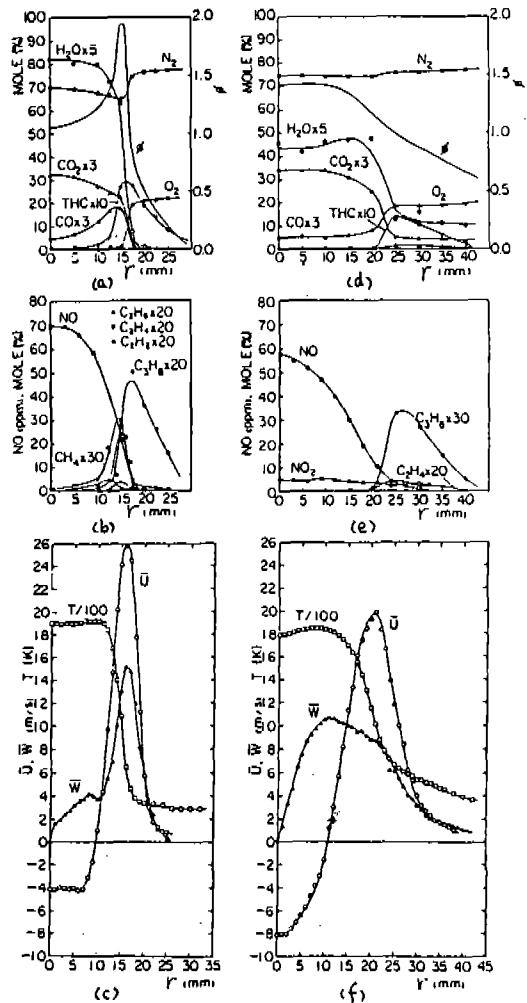
더 높은 온도의 유체가 낮은 온도 쪽으로 난류유동 함을 알 수 있으나, 선회유동이 있는 경우는 그 반대 현상이 일어남을 알 수 있었다. 즉 선회유동은 혼합특성을 오히려 지연시키는 역할을 함을 알 수 있다.

#### 4. 강선회인 경우 난류이동 현상

앞에서 언급하였듯이 선회도를 점점 증가시켜서 임계치를 넘기면 재순환영역(역류)이 형성되게 되며, 선회가 없을 경우에 비하여 유동장이 크게 바뀌게 된다. 그림 7는 재순환 영역이 형성된 프로판-공기 화염(선회도 = 1.8)의 시간평균속도 및 속도변동강도를 각 단면에 대하여 나타낸 것이다. 그림속의 점선은 축방향속도( $\bar{U}$ )가 제로인 점을 연결한 것으로서 내부는 역류가 일어나고 있음을 알 수 있다.  $Z = 15\text{mm}$  단면을 보면 중심축 부근에서는 음의 속도를 유지하다가, 반경방향으로  $r$ 이 증가하면  $r = 8\text{mm}$  근처에서 양의 속도로 변하여  $r = 16\text{mm}$  근처에서 피크치를 나타낸 후 외각으로 가면서 급격히 감소함을 알 수 있다.

한편 난류절대강도의 분포를 보면, 시간평균 속도분포로부터 구배가 가장 큰 두 곳에서 그 피크치가 나타난다. 이는 시간평균 속도분포로부터 난류생성 특성을 예측할 수 있는 것으로써 선회에 의하여 난류특성이 바뀌어졌다고 보기 어렵다. 전단층이 바뀌어져서 전단류 내에서 생성된 난류임에 틀림없다.

그림 8(a) - (f)는 그림 7과 같은 유동장에 대하여, 각종 화학종의 농도, 온도 그리고 속도분포를 나타낸 것으로써  $z = 15\text{mm}$  단면과  $z = 35\text{mm}$  단면에 대한 결과를 대비시켰다. 상기 결과로부터 다음과 같은 시간평균 구조를 제시할 수 있다. 예를들면  $z = 15\text{mm}$  단면의 온도분포를 보면  $r = 10\text{mm}$  이내에서 온도분포는 거의 평탄하며 단면내에서 최고온도를 갖고 있다. 즉 재순환 영역내에서는 고온가스가 축만해 있음을 알 수 있다. 이는 연소생성물의 농도( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ )의 분포를 보아도 알 수 있듯이 반응이 거의 끝난 연소가스가



(a). (b). (c)  $Z = 15\text{mm}$   
(d). (e). (f)  $Z = 35\text{mm}$

그림 8. 온도·농도 및 유속분포

이 영역내에서 존재함을 알 수 있다. 한편, 미연가스  $\text{CH}_4$ 와  $\text{C}_3\text{H}_8$ 의 농도분포를  $z = 15\text{mm}$  단면에서 살펴보면,  $r = 14\text{mm}$  근처에서  $\text{CH}_4$ 가 그 피크치를 나타내고 있다.

즉 연소노즐로부터의 연료는 대부분 재순환 영역을 관통하지 못하고, 이 영역의 주위를 타고 흐르게 되며, 재순환 영역내의 고온가스 때문에  $\text{C}_3\text{H}_8$ 가 급격히 열분해를 일으켜  $\text{CH}_4$ 와 같은 중간 물질이 재순환 영역과 연료류의 사이에 주로 존재함을 알 수 있다.

이는 선회유동에 대하여 재순환 영역이 크게 형성되고 그 주위에 연료유가 흐르면서 형성된 전단층내에서 주위공기와 혼합이 이루어짐을 의미한다고 판단된다. 이때 선회유동은 재순환 영역의 유지와 재순환영역 주위에 형성된 넓은 전단층을 제공하는 역할을 하였다고 생각할 수 있다.

5. 맺음말

이상 언급한 두 종류의 난류확산화염 연구 결과(약선회, 강선회)로부터 다음과 같은 결과를 도출할 수 있다.

- (1) 약선회일 경우는 난류유동에 의한 혼합 속도는 선회가 없을 경우보다 늦어진다.
- (2) 한편 강선회일 경우에는 재순환 영역의 형성으로 말미암아 시간평균 유동장이 크게 바뀌어 혼합 경계층의 확대로 말미암아 혼합 속도를 증가시킬 수 있다. 이를 도식화 하면 그림 9 와 같다.

한편, 금후 관련 연구는 그림 10 에 표시된 각항의 상호관련성에 대하여 집중되어야 할 것으로 사료된다. 시간평균 유동장과 난류특성에 관한 연구는 상당히 진행되었으나 약선회일 경우 여러가지 모델이 제안되어야 하겠다. 그리고 선회유동과 난류특성에 대하여서는 큰 연관성을 기대할 수 없으나 precessing vortex core 운동과 관련하여 큰 스케일 운동에 대한 연구결과는 기대된다.

그리고 본문에서는 난류확산 화염에 대한 선회유동의 효과에 대하여 개관하였으나, 자동차용 엔진연구에 더욱 선회운동이 적절히 도입되기 위하여서는 난류연소속도, 난류구조와의 관계에 관한 연구가 절실히 요망된다.

참 고 문 헌

1. 윤재건, 명현국, 신현동, 1984, "선회화염의 구조에 따른 NO, CO 및 THC 생성특성에 관한 연구" 대한기계학회 논문집 제 8권 3호, pp. 210~216
2. David G. Lilley, 1977, "Swirl Flows in Combustion : A Review", AIAA

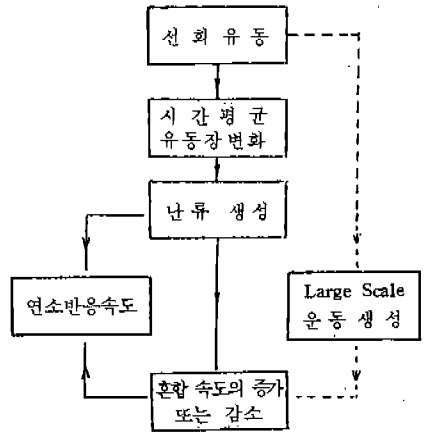


그림 9. 선회유동의 효과

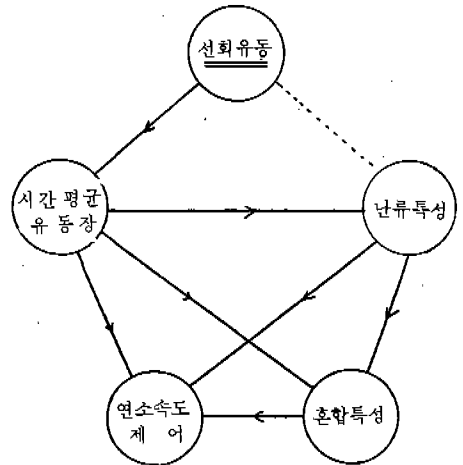


그림 10. 관련연구항목

Journal Vol. 15, NO. 8, pp. 1063~1078

3. N. Syred, J. M. Beer, 1973, "Effect of Combustion upon Precessing Vortex Cores Generated by Swirl Combustors" 14th symp. (Int.) on Combustion, The combustion Institute, pp. 537~549.
4. T. Takagi, T. Okamoto, M. Taji, Y. Nakasuji, 1984, "Retardation of Mixing and Counter-Gradient Diffusion in a Swirling Flame" 20th symp. (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 251~258.