한국화재소방학회 논문지, 제20권 제4호, 2006년
[논 문]
T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.
Vol. 20, No. 4, 2006

소방용 스프링클러 분기관의 설계 개선 및 제조공정

A New Design of Sprinkler Branch Outlet for Fire-Extinguishing Purposes and Its Manufacturing Process

전병윤 · 신상현* · 이민철** · 서관수*** · 전만수****†

B. Y. Jun · S. H. Shin* · M. C. Lee** · K. S. Suh*** · M. S. Joun****†

진ENG, *이스텍, **경상대학교 BK21, ***(사)경상대 수송기계부품기술혁신센터,
****경상대학교 기계항공공학부, 항공기부품기술연구소
(2006. 6. 23. 접수/2006. 12. 10. 채택)

요 약

본 논문에서는 소방용 스프링쿨러 분기관의 새로운 설계와 이의 제조 공정 기술을 제시한다. 기존의 세 조각 분기관이 냉간단조 기술의 적용으로 한 조각의 분기관으로 개선되었다. 새로운 분기관의 냉간단조 공정은 강소성 유한요소법에 바탕을 둔 단조시뮬레이션 기술을 이용하여 최적화되었다. 적용연구를 통하여 제안된 시스템이 훨씬 경제적이고 구조적으로 안전함이 입증되었다.

ABSTRACT

In this paper, a new design of the sprinkler branch outlet for fire-extinguishing purposes is presented together with its manufacturing process. The conventional three-piece design is improved by a new one-piece design with the help of the manufacturing technology of cold forging. The forging process is simulated and optimized by the rigid-plastic finite element method and the design tryouts are thus minimized. It has been shown through its applications that the presented system is much more economical and structurally stronger.

Keywords : Sprinkler branch outle, One-piece type, Finite element method, Cold forging

1. 서 론

도시의 주거지역과 상업지역이 고밀도화되고 있으며, 개인의 자동차 소유가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 주차난이 극심하며, 주차 능력이 해당 지역과 건물의 경쟁력과 직결되고 있다. 따라서 대부분의 고층 빌딩은 대형 지하 차고를 보유하고 있다. 지하 차고에서의 화재는 매우 위험하며, 그 가능성도 적지 않다. 자동차 그 자체가 화재의 불씨를 가지고 있으며, 화력 제공자의 역할도 한다. 그리고 화재 시 막대한 인명 피해와 물적 피해를 수반할 수 있으며, 화재 시 심한 매연으로 이차적인 피해를 동반할 수 있다. 따라서 지하 차고의 소방시스템은 매우 중요하며, 건축물과 마찬가지로 소방방재청 소방정책본부 소방제도팀에서 관련법으로 소방시설을 엄격하게 규제하고 있고, 선진화되면서 더욱 강화하는 방향으로 법이 개정될 것으로 예상된다.[1,2]

일반적으로 건물의 실내와 지하 차고의 소방시스템은 스프링클러 방식을 채택하고 있다.[3-5] 이 방식에서 핵심 요소는 스프링클러 헤드(Sprinkler head)까지 물을 전달하는 메카니즘, 즉 배관 시스템과 분기관이다. 배관 시스템은 주 배관과 가지 배관으로 이루어져 있고, 분기관은 가지 배관과 스프링클러 헤드를 연결시키는 역할을 한다.

건물 내의 경우, 스프링클러 헤드는 건물의 외관과 마감처리 등의 중요성 때문에 조립이 보다 간편하고 보기가 좋은 제품으로 점점 발전하고 있는 추세이다. 그러나 스프링클러가 조립되는 관 부속, 즉 분기관은 건물의 천정 속에 설치되어 보이지 않기 때문에 수십 년 전에 개발된 종래의 배관기술을 그대로 적용하고 있으며, 안전성이나 경제성 양면에서 낙후성을 면하지 못하고 있다.

† E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

우리나라에서 가장 보편적으로 많이 사용되고 있는 기존 방식이 가지고 있는 시공방법상의 특징은 배관을 절단하고 그 중간에 티(Tee)를 사용하여 분기관을 조립하는데 있다. 이러한 방식을 파이프연결형 분기관이라고 칭한다. 이 방식은 용접부위나 나사조립 부위가 너무 많아 용접이나 나사체결의 잘못으로 인한 누수나 관 파열의 우려가 크다. 그리고 공정이 복잡하여 시공시간이 많이 소요되기 때문에 시공비가 많이 소요될 수밖에 없다.

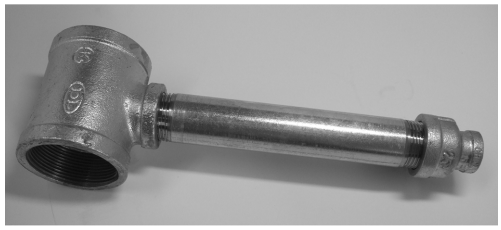
이러한 기존 방식의 문제점을 보완할 수 있는 방식이 직접접합형 분기관이다. 이 방식은 국내에서도 플랜트나 발전소 등 소방에 대한 요구조건이 엄격하거나 선진국의 기초설계에 바탕을 둔 시설물에서는 이미 오래전부터 사용되고 있다. 그러나 기존의 직접접합형 분기관은 3조각으로 이루어져 있어 가격이 비쌀 수 밖에 없기 때문에 일반 아파트 및 상업용 시설물로 적용이 확산되지 못하고 있다. 그 결과, 대부분의 건설현장에서는 가단주철제 관이음쇠[6]와 강제맞대기 용접식 관이음쇠[7] 등 기존의 파이프연결형 분기관을 그대로 사용하고 있다.

기존의 분기관은 시스템이 매우 복잡하고, 구조적으로도 안전하지 않다. 무엇보다도 연결부의 수밀을 유지하는데 소요되는 비용이 많고, 미관상 좋지 않다. 따라서 획기적인 개선책이 절실히 요구되고 있다. 본 논문에서는 분기관의 새 모델을 제시하고, 이를 제조하기 위한 신공법을 중점적으로 논하고자 한다. 그리고 실제 시공 사례를 제시함으로써 제시된 설계와 관련 부품 제조 기술의 타당성을 검증하고자 한다.

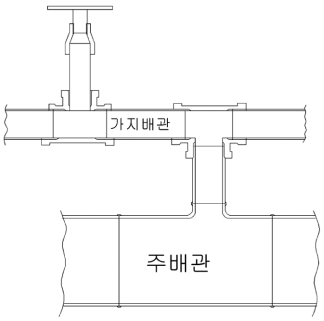
2. 분기관의 설계 및 제조 기술

현재 국내외적으로 사용 중인 분기관은 크게 파이프연결형 분기관과 직접접합형 분기관의 두 종류가 있다. 이 분기관들은 주로 꼭지, 가지 파이프, 연결부 등의 3조각으로 되어 있어, 시공이 복잡하고 그에 따라 시공비가 많이 소요되는 문제를 안고 있다. 연결부와 가지 파이프를 일체형으로 만든 2조각 직접접합형 분기관도 사용되고 있으나, 이 역시 제조공법 상의 한계와 시공 상의 문제점은 동일하다. 현재 국내에서 주로 사용하고 있는 분기관은 파이프연결형이며, 외관은 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같다.

파이프연결형 분기관은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 가지 배관을 절단하여 분기관의 파이프부가 용접될 수 있는 티(Tee)를 설치함으로써 분기관이 시공될 수 있는 구조로 만든다. 그리고 티에 가지 파이프를



(a) T-type branch outlet

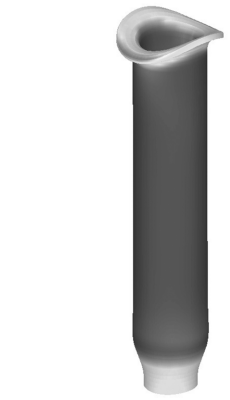


(b) Application drawing

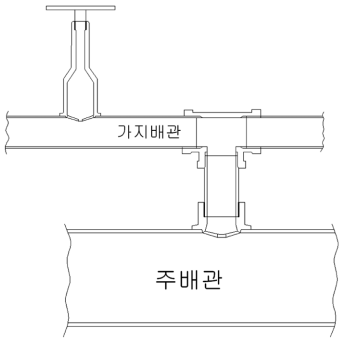
Fig. 1. Conventional T-type 3 piece branch outlet.

용접하고 이 가지 파이프와 꼭지(Nipple)를 볼트 체결한 후 용접하고 있다. 기존의 3조각 직접접합형 분기관도 기본 개념은 파이프연결형 분기관과 크게 다르지 않다. 다른 점은 가지 배관을 절단하지 않는 대신 가지 배관에 구멍을 내고 체결부를 용접하는 점이다. 즉, 파이프연결형에서 사용하는 티이음(T-connection) 대신 열간단조 후 기계가공된 체결부, 즉 연결부를 사용하는 것이 다른 점이다. 직접접합형 분기관은 미국, 일본 등 선진국에서는 이미 오래전부터 사용하고 있는 것으로 국제 규격[8-10]으로 인정되었으며, 1980년대부터 대형 석유화학 플랜트나 발전소 등의 건설에 활용되고 있다.

기존의 두 방법은 공히 2조각 또는 3조각의 부품을 사용하기 때문에 시공이 까다롭고 품질 보증이 용이하지 않을 뿐만 아니라 시공비가 많이 소요되는 문제를 안고 있다. 설상가상으로 기존의 분기관 관련 산업이 기술 경쟁보다 가격 경쟁에 치우친 나머지 소품종 대량생산의 형태로 발전해 왔다. 이로 인하여 사용자는 생산자가 제조하여 공급하는 제한적인 종류의 제품을 선택하여 사용할 수밖에 없기 때문에 시공비가 이중으로 들어가거나 부실 공사로 연결되는 사례가 빈번한 실정이다. 더욱이 시공업자들 간의 과당 경쟁에 따른 저가 수주로 인하여 소위 말하는 뽕따기 공법, 티뽑기



(a) A new branch outlet



(b) Its application drawing

Fig. 2. A new branch outlet and its application drawing.

공법[11] 등 불법시공이 여전히 존재하고 있으며, 그 결과, 물의 흐름이 방해된다든지 응력 부식 및 크랙의 발생으로 인하여 사용자에게 막대한 피해를 초래할 우려를 낳고 있다.

따라서 경제적이면서 안전성이 확보된 새로운 공법이 절실히 필요한 시점이다. 특히 우리나라에서 가격이 싸기 때문에 가장 널리 사용되고 있는 기존의 파이프연결형 분기관의 체결부, 즉 티는 가단주철의 주조품인데, 국내 산업계가 제조를 기피하는 관계로 국내 소요량의 80% 이상을 중국 등에서 수입하고 있는 실정이다. 그러므로 이 방법의 근본적 개선이 요구되고 있다. 이러한 취지하에 본 논문에서는 1조각 직접접합형 분기관, 즉 복합분기관을 제안한다.

복합분기관은 Fig. 2(a)(성형공정의 유한요소해석 결과)에서 보는 바와 같이, 연결부, 가지 파이프, 꼭지 등이 일체형으로 되어 있어 구조적으로 매우 안전하며, Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 시공이 매우 용이한 장점을 지니고 있다. 가지 배관과 복합분기관의 접합 방법은 직접접합형 분기관과 동일하므로 복합분기관은 1조각 직접접합형 분기관이다.

기존의 분기관은 모두 2조각 또는 3조각으로 이루어져 있고, 체결부는 주조 또는 열간단조 후 후속 기계가공이 필요하며 시공 시 결합하는데 많은 공수가 필요한 반면, 복합분기관은 스프링클러 헤드의 조립에 필요한 나사가공만을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서 제시한 복합분기관은 품질, 재료의 회수율, 시공 및 유지보수의 용이함, 부품 가격 및 시공비 등 모든 면에서 획기적이다.

문제는 제조 기술에 있다. 본 논문에서는 품질, 가격, 시공의 용이성 등을 동시에 충족시킬 수 있는 신공법을 제시한다. 신공법은 파이프의 절단, 윤활처리, 냉간단조로 이루어져 있다.

분기관은 현재 주문자 요구 제작 방식으로 제조되고 있으며, 종류가 다양하므로 단조 공정의 최적설계 및 시행착오의 최소화는 중요하다. 본 연구에서는 단조 공정의 효율적 설계를 위하여 단조시뮬레이션 기술[12]을 사용하였다.

3. 단조공정의 해석 및 설계

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V와 경계영역 S로 나누어지며 경계영역 S는 표면력이 $t_i = \bar{t}_i$ 로 주어진 경계 S_{t_i}, 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 경계 S_{v_i}, 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 경계 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 금형-소재 접촉면에서 압축력이 작용하면, 금형과 소재의 법선속도는 동일하다. 즉 S_c에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 본 논문에서 하첨자 n과 t는 각각 법선성분과 접선성분을 의미한다.

소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(Isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있고 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따르며, 접촉면에서 일정전단마찰법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 자중 및 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i를 구하자는 것이며, 벌칙기법을 이용하여 비압축성 조건을 처리하면, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_V \sigma'_{ij}\omega'_{ij}dV + \int_V K\dot{\varepsilon}_{ii}\omega_{jj}dV - \int_{S_{t_i}} \bar{t}_i\omega_i dS + \int_{S_c} \mu\sigma_n g(v_t)\omega_t dS = 0 \quad (1)$$

여기서 가중함수 ω_i는 경계 S_{v_i}에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고,

$$\omega_{ij} = \frac{(\omega_{i,j} + \omega_{j,i})}{2} \quad (2)$$

이다. 벌칙상수 K는 매우 큰 값의 양수이며, 다음의 물리적 의미를 갖는다.

$$K\dot{\varepsilon}_{ii} = \sigma_{jj}/3 = -p \quad (3)$$

따라서 벌칙기법을 사용할 경우, 압력분포 p는 속도장 해석결과로부터 자동적으로 구해진다.

식 (1)에서 k는 전단항복응력이며, μ은 마찰계수이다. 함수 $g(v_t)$는 접촉면에서 소재와 금형의 상대속도의 영향을 반영하는 함수이며, 접촉면에서 미끄럼이 발생하면 그 절대값이 1이 되고, 미끄럼이 발생하지 않으면 1보다 작은 절대값을 갖는다. 즉, 함수 $g(v_t)$는 상대속도가 마찰에 미치는 영향을 고려하는 역할, 수치적 문제점을 완화시키는 역할, 고착상태 $(v_t = \bar{v}_t)$ 를 만들어 줌으로써 전단응력이 이론적 한계를 못 넘게 하는 역할 등을 수행하는 함수이며, Chen과 Kobayashi[13] 가 제안한 다음의 함수가 가장 널리 사용되고 있다.

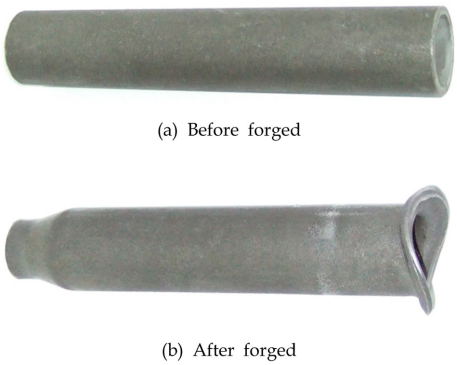
$$g(v_t) = -\frac{2}{\pi}\tan^{-1}\frac{(v_t - \bar{v}_t)}{a} \quad (4)$$

여기서 v_t와 $\bar{v}_t$는 각각 소재와 금형의 접선속도성분을 나타내며, a는 아주 작은 양의 상수이다.

식 (1)에서 편차응력텐서 σ'_{ij}는 소성유동법칙에 의하여 다음과 같이 변형률속도 $\dot{\varepsilon}_{ij}$의 함수로 n표현된다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\bar{\varepsilon}}}\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}$와 $\dot{\bar{\varepsilon}}$는 각각 유효응력과 유효변형률속도를 의미한다. 식 (1)을 유한요소법에 의하여 이산화시키면, 비선형방정식이 유도된다. 이와 관련된 상세한 내용은 참고문헌[14]으로 대신한다.



(a) Before forged

(b) After forged

Fig. 3. A new sprinkler branch outlet, cold forged.

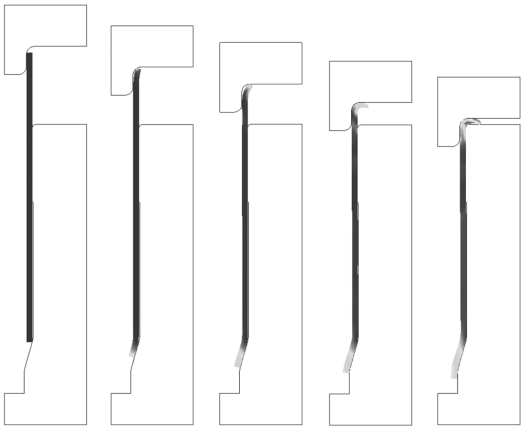


Fig. 4. Simulation result by the two dimensional rigid-plastic finite element method.

본 연구에서 개발한 복합분기관의 재료는 일반배관용강관(KS D3507)이며, 변형저항식, 유효응력과 유효변형률의 관계는 $\bar{\sigma} = 617\bar{\varepsilon}^{0.25}$ 이다. 그리고 마찰계수를 0.05로 간주하였다. 개발된 분기관 중에서 대표적인 제품을 소재와 함께 Fig. 3에 나타내었으며, 3차원 모양을 Fig. 2(a)의 단조공정 시뮬레이션 결과로 나타내었다. 본 논문에서 제시하는 단조공정 관련 내용은 Fig. 3의 제품을 대상으로 한 것이다.

다품종 소량생산 목적의 단조 공정의 설계에 있어서 단조 단수의 최소화는 매우 중요하다. 본 연구에서 단조 공정의 설계 시 주요 고려 대상은 하나의 단조 공정으로 분기관을 성형하는 것이다. 따라서 냉간단조 시, 상하부의 양단의 소성변형량을 통제하는 기술이 핵

Fig. 5. Comparison of the predictions with the experiments.

심 기술이며, 2차원 및 3차원 단조 시뮬레이션 기술을 활용하여 최적의 조건을 찾았다. 이 목적으로 전술한 이론에 근거한 단조시뮬레이터 AFDEX[15]를 사용하였다. Fig. 4에 2차원 단조 시뮬레이션 결과를 나타내었으며, 3차원 해석 결과를 실제의 제품과 Fig. 5에서 비교하였다.

4. 결과 분석

복합분기관의 개발에서 우선적으로 고려되어야 할 사항은 Fig. 6에서 정의된 노즐부의 길이와 가지배관 연결부의 두께를 적절한 크기로 확보하는데 있다. 이 두 개의 요건은 서로 상충되는 점이 있다. 연결부의 두께를 요구조건 이내로 확보하기 위해서는 두께의 증가가 불가피한 반면, 두께를 키우면 일반적으로 노즐부의 길이가 짧아지는 경향이 있기 때문이다.

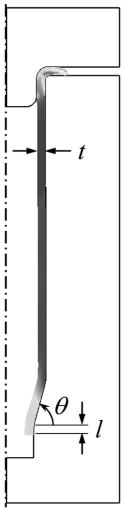


Fig. 6. Definition of process and product parameters.

Table 1. Variation of the extruded nozzle length with the extrusion die angle and the tube thickness

(Unit: mm)

Extrusion die angle, θ (°)	Tube thickness, t (mm)			
	2.5	3.0	3.5	4.0
55	2.08	2.13	1.7	1.4
60	2.66	2.4	2.3	1.71
65	3.56	3.29	2.88	2.69
70	4.11	4.78	3.95	2.74
75	5.79	6.64	5.11	3.65
80	5.24	3.38	2.83	2.53
85	0	0	0	0

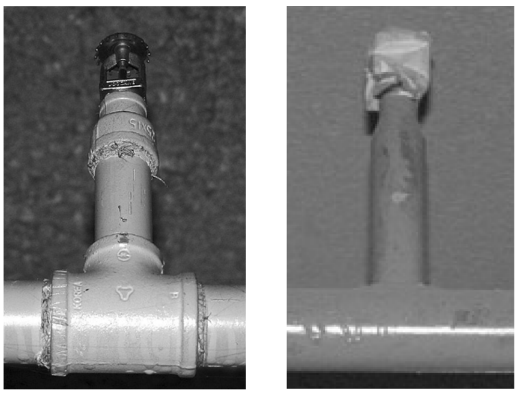
한편, 압출된 노즐부의 길이는 두께의 영향뿐만 아니라 압출금형의 각도 영향을 비교적 크게 받는다. 그러므로 두께와 압출금형의 각도가 압출된 노즐부의 길이에 미치는 영향을 조사하기 위하여 다양한 조건 하에서 유한요소해석을 실시하였으며, 그 결과를 Table 1에 정리하였다.

이 결과에 의하면, 외경이 16.9 mm일 경우 금형 각도는 75도 전후에서 최적의 상태를 나타내는 반면, 추가적인 금형 각도의 증가에 따라 압출된 노즐부의 길이가 급격히 줄어들고 80도가 되면 노즐부가 형성되지 않음을 알 수 있다. 따라서 설계 시에 몇 가지 요구조건들이 상호 연계되어 있으므로 설계요구조건을 충족시키기 위한 단조 시뮬레이션 기술은 성공적인 복합분기관 제조공정의 개발과 최적설계를 실시하는데 매우 효과적이며, 특히 고객 주문형 복합분기관의 개발 및 공급을 위하여 필수적인 기술이다.

본 논문에서 제시한 분기관의 설계 및 제조 기술을 활용하면, 다품종 소량생산이 가능하므로 맞춤형 분기관의 제조가 가능하다. 즉, 각각의 시설물에 적합한 분기관의 주문 생산이 가능하다는 장점이 있다. 기존의 분기관은 소품종 대량생산 방식으로 제조되었기 때문에 사용자의 선택 폭이 매우 좁아 사용자의 특수 상황을 반영할 수 없음으로 인하여 부실시공으로 연결되는 경우가 많았다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 다양한 길이의 분기관을 주문자 요구 방식으로 제조가 가능하며, 단조의 특성상 짧은 시간에 많은 양을 생산할 수 있는 장점이 있다.

제안된 방법에서는 스프링클러 헤드의 부착을 위한 나사가공만 필요로 하므로 후가공의 최소화가 이루어

Fig. 7. Various cold forged products.[9]



(a) Old three-piece T-type (b) New one-piece type

Fig. 8. Comparison of the old and new sprinkler branch outlets.

졌으며, 이로 인해 재료 수율이 97%에 이르므로 기존 시스템의 재료 수율 80%에 비하면 획기적인 결과이다.

Fig. 8에 적용 사례를 나타내었으며, 기존 분기관의 시공 사례를 비교 목적으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 본 논문에서 제시한 방법의 장점으로 먼저 미관을 들 수 있다. 과거 투박하게 보이던 분기관이 비교적 세련된 모습으로 탈바꿈하게 되었다. 시공 측면에서도 제안된 분기관이 훨씬 유리하여 기존의 것이 20분 소요될 때 신 제품의 시공 시간은 5분 내외 소요될 것으로 예상된다. 제조원가 측면에서도 매우 유리하다고 사료된다. 단조는 대량생산이 주목적이지만, 현재 타 방식이 비경제적이기 때문에 다품종 소량생산으로도 경제성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

단조품은 비교적 엄격하게 품질관리가 가능하다. 동일한 금형과 조건에서 동일한 제품의 생산이 가능하기 때문이다. 따라서 불량률(약 5% 정도 추정됨)을 0.1% 이하로 떨어뜨릴 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 파이프제는 고급 소재이고 단조를 통하여 품질이 일반적으로 개선되므로 기존의 제품에 비하여 품질 수준도 월등히 개선될 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 논문에서는 소방용 복합분기관의 설계 및 제조기술[16]을 제시하였다.

기존의 분기관은 파이프연결형과 2조각 또는 3조각 직접접합형이 있으며, 현재 국내에서 가장 널리 채택되고 있는 분기관은 파이프연결형 분기관이다. 기존의 분기관은 2조각 또는 3조각으로 이루어져 있어 시공이 복잡하고 구조적으로도 안전하지 않다. 무엇보다도 연결부의 수밀을 유지하는데 소요되는 비용이 많고, 분기관이 노출되어 있는 실내 주차장의 경우 미관상 좋지 않다. 특히 사용자가 필요로 하는 맞춤형 분기관을 제조하는 것은 많은 비용이 소요되기 때문에 쉽지 않다.

본 논문에서 제안된 복합분기관은 파이프를 냉간단조 공법으로 성형함으로써 일체형으로 제조되었다는 것이 특징이다. 그 결과, 가격, 품질, 미관, 시공의 용이성 등 다방면에서 적용사례를 통하여 기존의 방법에 비하여 월등한 경쟁력을 갖추고 있는 것으로 분석되었다. 특히, 대규모의 제조시 원가경쟁력이 월등히 개선될 것이며, 제안된 분기관의 채택이 점증할 것으로 기대된다.

기존의 파이프연결형 분기관은 주조품의 기공 및 편석, 용접 및 체결 부위의 결함 등으로 누수와 파열로 인한 품질 문제가 빈번하게 발생하고 있으나, 본 논문에서 제시한 제품은 냉간 단조품으로 기존 방식에 비해 강도가 현저히 개선되고 부품의 단순화로 누수 및 파열의 위험으로부터 안정성을 확보할 수 있다.

후 기

본 연구는 (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터의 정밀냉간단조시험평가시스템을 사용하여 이루어졌으며, 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 실시된 연구 결과의 일부임.

참고문헌

1. 홍경표, 이영재, 김선경, “지하공동구의 연소방지 설비에 관한 연구”, 한국화재소방학회 추계학술대회 논문집, pp.284-293(2001).
2. KFIS 020, “소화설비 배관이음쇠의 인정기준”, 한국소방검정공사.
3. 권오승, “성능 위주의 방화설계를 위한 스프링클러 헤드의 특성”, 한국화재소방학회지, Vol. 1, No. 2, pp. 20-27(2000).
4. 송철강, 이명호, 강계명, “배관망 해석 방법을 이용한 스프링클러 시스템의 수리 계산 프로그램 개발”, 한국화재소방학회지, Vol. 16, No. 1, pp.24-29(2002).
5. 김엽래, 이동명, “스프링클러 헤드 Emergency 장비 개발”, 한국화재소방학회 하계학술논문발표회 논문집, pp.110-116(2004).
6. KS B 1531, “나사식 가단 주철제 관 이음쇠”.
7. KS B 1522, “일반 배관용 강제 맞대기 용접식 관이음쇠”.
8. 미국 MSS-SP97, “Integally Reinforced Forged Branch

Outlet Fittings-Socket Welding, Threaded and Butt-Welding Ends", 미국 밸브피팅제조자협회규격.
9. Banny Forge, http://www.bonneyforge.com.
10. SungKwang, "Steel Pipe Fitteings", Catalog(2000).
11. 이스텍, "소방관용 분기구", 기술보고서(2005).
12. M. S. Joun and M. C. Lee, "Quadrilateral Finite-Element Generation and Mesh Quality Control for Metal Forming Simulation", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, No. 21, pp.4059-4075(1997).
13. C. C. Chen and S. Kobayashi, "Rigid-Plastic FEA of Ring Compression, Appl. of Num. Methods to Forming Process", ASME, AMD 28, pp.163-174 (1978).
14. 전만수, 이형일, 연속체역학에서 유한요소법까지, Prentice Hall(2000).
15. AFDEX, Metal Forming CAE LAb, Gyeongsang National University.
16. S. H. Shin, B. Y. Jun, M. S. Joun, M. C. Lee, and H. K. Moon, Patented Number: 10-2004-0043175.